



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

유연 기판 위 박막 금속의 비틀림 피로  
거동 및 신뢰성 분석에 대한 연구

Twisting Fatigue Behavior of Thin Film Metal on  
Flexible Substrate and Reliability Analysis

2017년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

양 정 권

## 초록

현대의 전자기기는 기존의 휴대성을 넘어 생활 밀착형 소자로 발전하고 있다. 유연소자의 개발로 인해 설치 장소 제약이 줄었고 입거나 피부에 붙이고, 심지어 몸 속에 삽입까지 하는 형태로 다양하게 발전하고 있다. 사용자의 생활 정보를 실시간으로 얻기 위해 인체와 점점 가까워지는 과정에서, 신체의 곡률이나 변형률 등이 주요 구동 환경이 되었고 최대 약 20 %의 변형률에 대한 내구성을 요구한다. 이러한 요구에 따라서 기존 전자기기의 전기적, 열적 신뢰성뿐만 아니라 기계적 변형에 대한 신뢰성이 매우 중요해지게 되었다. 그 중에서도 반복 변형 구동 환경에 대한 기계적 신뢰성은 유연소자의 상업화 및 장기 신뢰성 확보에 필수적이다.

전자기기의 여러 재료들 중에서도 전극과 배선 역할을 담당하는 금속재료는 소자의 성능에 가장 직접적이고 큰 영향을 미친다. 기존 유연 기관 위 박막금속의 피로특성 연구들은 주로 굽힘 및 인장 변형의 신뢰성 평가에 대해 보고했고, 이는 단축 및 균일 변형에 한정되어 있다. 하지만 실제 유연전자기기의 구동 환경은 당김이나 굽힘의 변형과 비틀림 변형이 조합되거나 심지어는 구김과 같이 더욱 복잡하고 다양한 변형을 받게 된다. 이러한 변형들은 다축 및 분균일 변형에 해당한다. 비틀림 변형은 다른 기본 변형 형태와 다르게 두축 및 불균일 변형을 발생시키고 다중 응력 요소가 동시에 작용한다. 따라서 복합 변형에서의 피로거동을 이해하기 위해 비틀림 변형에 대한 피로거동 연구는 선행되어야 한다.

본 연구에서는 유연 기관 위 증착 된 구리 박막 배선의 반복 비틀림 변형에 따른 기계적 피로 현상을 조사하였다. 비틀림 각도 및 구리 배선의 기관 위 위치가 변형률 및 응력에 주는 영향에 대해 연구를 진행했고 각 조건 별 신뢰성을 평가하였다. 각도가 커질수록, 위치가 회전축으로부터 멀어질수록 전기저항은 더 낮은 반복 변형에서도 크게 증가했다. 피로

손상을 전자현미경으로 관찰 했을 때, 조건에 따라 탄성 및 소성 변형률이 크게 작용하는 구간이 있고 이는 각도 및 위치 변수에 의해 결정된다. FEM simulation 및 analytic model 을 통해 계산한 변형률 값을 이용하여 변형률과 피로수명이 Coffin-Manson 및 Basquin 관계를 따름을 확인했고, 해당 샘플에서의 탄성 영역과 소성 영역을 명시했다.

본 연구는 비틀림 변형에서의 금속 박막의 피로 거동을 규명했고 변형률 및 응력 해석을 통한 소자 설계 가이드라인을 제시했다.

**표제어:** 유연 소자, 비틀림 피로 거동, 금속 박막, 응력 분석, 신뢰성

**학 번:** 2015-20840

# 목차

## 1. 서론

---

1.1. 유연소자의 발전 .....	1
1.2. 기계적 신뢰성 평가의 중요성 .....	3
1.3. 비틀림 피로 신뢰성 연구의 필요성 .....	3
1.4. 본 논문의 구성 .....	7

## 2. 이론적 배경

---

2.1. 물질의 피로거동 .....	8
2.1.1. 응력 제어 피로실험 .....	9
2.1.2. 변형률 제어 피로실험 .....	12
2.1.3. 물질의 피로 파괴 .....	15
2.1.4. 박막 물질의 피로거동 효과 .....	18
2.2. 비틀림 변형에서 응력 분포 .....	19

## 3. 실험방법

---

3.1. 비틀림 장비 설계 및 제작 .....	23
3.2. Sample 설계 및 제작 .....	25
3.3. 비틀림 피로 실험 .....	27
3.4. FEM simulation을 통한 응력 분포 및 변형률 계산 .....	27

## 4. 결과 및 고찰

---

4.1. 필름형 구리의 비틀림 피로 거동 .....	30
4.2. 배선형 구리의 비틀림 피로 거동 .....	33
4.3. 각도 및 위치에 따른 변형률 값 계산 .....	38

4.3.1.	FEM simulation을 이용한 변형률 계산 .....	38
4.3.2.	Analytic model을 이용한 변형률 계산 .....	42
4.4.	Strain-failure cycle curve .....	46
4.4.1.	Shear/tensile strain-failure cycle curve .....	46
4.4.2.	Von Mises strain-failure cycle curve .....	46
5.	요약 및 결론 .....	50
	참고문헌 .....	53
	Abstract .....	60

## LIST OF TABLES

<b>Table. 4.1</b>	Fatigue lifetime at different position and angle by cumulative failure plot.
-------------------	--

## LIST OF FIGURES

<b>Figure. 1.1</b>	(a) Deformation mode that can be applied to the flexible devices. (b) Development of the flexible devices toward human body.
<b>Figure. 1.2</b>	Stress distribution on surface by sample shape
<b>Figure. 2.1</b>	Stress parameters. In one cycle mean stress is (a) zero and (b) non-zero mean stress.
<b>Figure. 2.2</b>	Diagram of $\sigma_a-N_f$ with different materials.
<b>Figure. 2.3</b>	Strain amplitude vs. fatigue lifetime. Total strain ( $\varepsilon_a$ ) is composed of elastic ( $\varepsilon_{ae}$ ) and plastic strain ( $\varepsilon_{ap}$ ). Strains are plotted as functions of the $N_f$ and these parameters have reversal relation.
<b>Figure. 2.4</b>	(a) Hysteresis loop of $\tau_r-\gamma_s$ . (b) CSS curve of fcc single crystals. This curve is plotted from the tips of the stable loops.
<b>Figure. 2.5</b>	Schematic of PSB structure. Dislocations arrange in $(\bar{1}\bar{2}1)$ section

and form the vein structures and PSB wall.

- Figure. 2.6** Maximum shear stress equation with different cross section of the sample.
- Figure. 2.7** Maximum shear stress equation with different cross section of the sample. At corner and edge of the sample, shear strain is 0 and maximum shear strain is at the center of the longer line.
- Figure. 3.1** Developed twisting tester In-situ measurement of resistance change is possible by connecting the measuring part to tester. 9 data of electrical resistance change by twisting can be obtained in one set of test..
- Figure. 3.2** Schematics of samples. (a) Film type and (b) line type Cu on PI substrate.
- Figure. 3.3** Modeling for FEM simulation. Model is represent for the only PI substrate.
- Figure. 4.1** Resistance change by cyclic twisting in film type sample.
- Figure. 4.2** Damage morphologies on surface of the film type sample by (a) OM along the y direction and (b) SEM along the x direction.
- Figure. 4.3** (a) Resistance change of Cu line by cyclic twisting with different position on PI substrate. (b) Cumulative probability



vs. failure cycles for fatigue lifetime of each of the position.

**Figure. 4.4** Damage morphologies on surface of the line type sample with different position by (a) OM and (b) SEM

**Figure. 4.5** Resistance change of Cu line with different angle and position.

**Figure. 4.6** Results of the FEM simulation with various twisting angles.

**Figure. 4.7** (a) Strain components values with different position and angle and (b) equivalent strain as a function of position and angle.

**Figure. 4.8** Analytic equation for tensile strain by twisting. The equation can be simplified because  $t$  is very small compared to the width.

**Figure. 4.9** Comparison between analytic and FEM simulation of equivalent strain by various positions and angles.

**Figure. 4.10** Strain vs. failure cycle using (a) tensile or shear strain only and (b) equivalent von Mises strain that includes both tensile and shear strain.

# 1. 서론

## 1.1. 유연소자의 발전

Flexible device는 2000년대 초반 미국 Bell Lab.에서 유기물 기반의 flexible display 연구로부터 시작하여 발전해왔다 [1.1 - 1.6]. Flexible device를 굽히거나 당기거나 비틀 수 있고 심지어는 구김도 가능하다. Fig. 1.1a와 같이 다양한 변형이 가능하여 모양과 설치 장소 등에 제약이 적고 무게가 가벼운 장점들을 지니고 있다. Flexible device는 wearable, attachable, implantable 등 생활밀착형 device로 적용 분야가 다양하다 (Fig. 1.1b). Flexible device는 인체에서 발생하는 여러 신호들을 감지하고 사용자에게 정보를 제공하는 역할을 하기때문에, 향후 사물인터넷(Internet of Things) 등과의 연계를 통해 새로운 시장을 선도할 것으로 기대하는 분야이다. Flexible display 분야에만 한정 지어 보아도, 시장조사 전문기관인 display search에 따르면 시장 성장이 연평균 48%로 크게 성장할 것으로 전망하고 있다. 2015년 24억달러 수준에서 2021년 209억 달러 규모로 성장할 것으로 전망하고있다 [1.7].

Flexible device의 개발을 위해 소자를 구성하는 각 부품의 분야에서 연구가 활발히 진행되고있다 [1.8-1.11]. Display, battery, interconnects 의 다양한 분야에서 소재의 개발, 박막화 및 구조 개선 등 소자의 유연화를 이루고자 노력하고 있다. 현재 flexible device에서는 소자의 부품들뿐만 아니라 e-skin, flexible photovoltaics, soft robotics 등 여러 분야를 아우르는 융복합 연구가 진행되고 있다.



Figure. 1.1 (a) Deformation mode that can be applied to the flexible devices. (b) Development of the flexible devices toward human body.

## 1.2. 기계적 신뢰성 평가의 중요성

Flexible device의 발전에 따라 신뢰성의 의미는 더욱 부각되었다. 기존의 rigid portable device에서 의미하던 신뢰성은 주로 electromigration이나 time dependence dielectric breakdown (TDDB)와 같은 전기적 신뢰성을 의미했으며, 기계적인 변형이나 물리적 충격 등에 의한 device의 파손은 주로 우발적인 사고로 생각하였다. 하지만 flexible device에서는 기계적인 변형이나 응력이 실제 구동 환경이 되어 전기적 신뢰성뿐만 아니라 기계적인 신뢰성 또한 중요한 고려사항이 되었다.

Flexible device는 인체의 몸에 가까워지고 있으며 wearable, attachable, implantable으로 적용 분야가 발전 할수록 인체의 굴곡에서부터 근육이나 장기 등의 역동적인 움직임까지의 극한의 변형 환경에서도 작동가능해야 한다. Flexible device가 인체의 변형에 잘 견딜 수 있게 개발되었음에도, 반복적인 변형이 가해지게 되면 소자의 성능이 떨어지게 된다. 따라서 flexible device에서 신뢰성의 의미는 전기적 신뢰성뿐만 아니라, 변형 환경에서의 기계적 신뢰성도 동시에 포괄하는 의미여야 한다. 또한 기계적 손상이 전기적 신뢰성에 주는 영향을, 반대로 전기적 손상이 기계적 신뢰성에 주는 영향을 유기적으로 연관 지어 확장된 신뢰성의 의미를 구체화해야 한다.

## 1.3. 비틀림 피로 신뢰성 연구의 필요성

기존의 기계적 변형에 대한 신뢰성 평가는 주로 bending 및 stretching에 한하여 실시되었다 [1.12-1.20]. Bending 및 stretching strain이 점점 증가될 때 flexible device가 작동하는지 여부를 확인하거나

반복 변형을 주어 장기간 변형 인가 후에도 소자가 성능이 유지되는지를 점검해왔다. 하지만 기존 기계적 신뢰성 평가는 단순히 uniaxial 및 uniform 변형에 해당하는 조건에 한하여 실시되었다. 실제 wearable, attachable, implantable의 소자가 받을 수 있는 변형 및 응력은 multiaxial 및 non-uniform 변형이다. 인체의 움직임은 비틀림과 굽힘이나 비틀림과 당김 등 여러 복합 변형을 소자에 인가하기 때문에, 기존의 uniaxial 변형에서 보다는 multiaxial 변형 조건 하에서 기계적 신뢰성 평가를 진행해야 한다. 기본적인 변형들 중에서 비틀림 변형은 다른 변형과 다르게 biaxial stress인 shear stress가 발생하고 tensile stress와 복합적으로 작용하여 bending 및 stretching보다 복잡하다. 또한 Fig. 1.2 와 같이 샘플의 모양에 따라서 응력 분포가 달라지는데, rod type의 샘플의 경우에는 샘플 표면에서 shear 와 tensile stress가 균일하게 분포하지만 plate type에서는 불균일한 응력 분포를 보인다. Plate type에서의 불균일한 응력 구조 때문에 각 구간마다 dominant stress component가 존재하고 그에 따른 기계적 신뢰성 차이를 보인다. 박막형 소자는 후자인 plate type에 가까운 구조이므로 응력 분포를 분석하고 그에 따른 신뢰성을 평가하는 것은 매우 중요하다.

기존의 flexible device의 비틀림 실험을 진행한 연구들은 어떤 방식으로 진행했는지 확인해보았다 [1.21-1.30]. 논문들을 종합해보았을 때, 기존 비틀림 신뢰성 평가에서 3가지 한계점을 발견했다. 첫째, 실험 조건을 오로지 비틀림 각도로만 표기했다. Bending 및 stretching에서의 신뢰성 평가에서는 소자에 가하는 변형 환경을 strain으로 표현하여 다른 논문에서의 사용한 변형 환경을 비교할 수 있었다. 하지만 지금까지의 비틀림 신뢰성 관련 논문들은 비틀림 각도만을 사용하여 각 논문들과의 수직 수평 거리, 샘플의 모양, 너비와 길이의 비율 등 strain에 영향을 주는 요인이 상당히 많다. 따라서 같은 비틀림 각도 환경이라고 해도 다른 요인들에 의해 strain 값이 다를 수 있다. 둘째, 대부분의 실험은 single

loading만을 가했다. 대부분의 실험들은 비틀림 각도를 증가시키며 해당

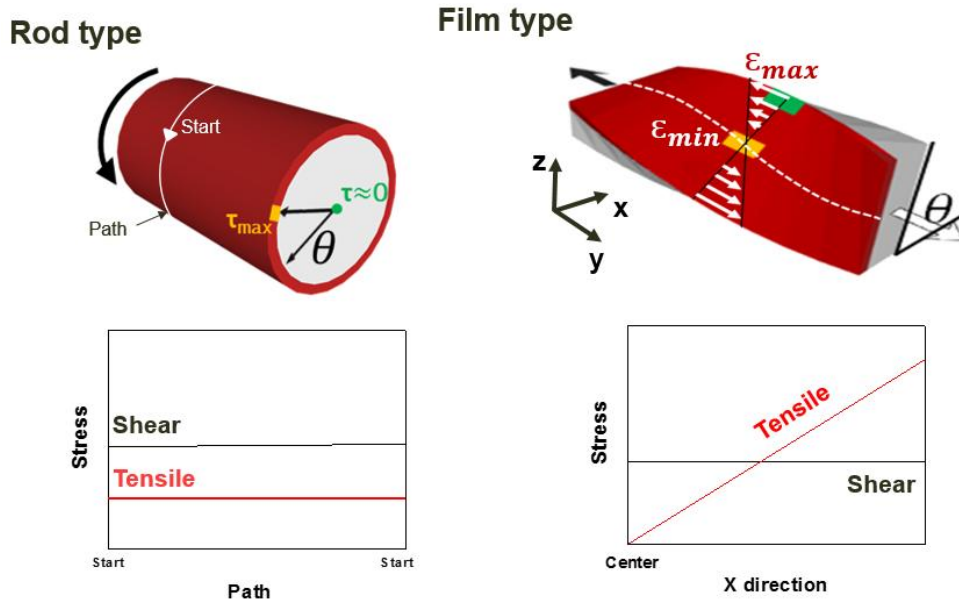


Figure. 1.2 Stress distribution on surface by sample shape.

flexible device를 최대 몇도 까지 비틀 수 있는지를 확인했고, 어느 각도까지 성능이 유지 되는지 만을 평가했다. 이 논문들은 피로 파괴

의미의 long term reliability를 포함하지 않았다. 셋째, 높은 각도 및 높은 반복 변형 횟수에서의 비틀림 피로거동 연구가 부족하다. 조사한 논문들은 보통  $90^\circ$  이하의 각도에서 100 회 이하의 반복 변형 조건에서 비틀림 신뢰성 평가를 진행했다.  $90^\circ$  이상, 100 회 반복 변형 횟수 이상의 조건의 연구가 활발히 진행되지 않았다.

기존 비틀림 신뢰성 관련 연구의 3 가지 한계점을 보완하기 위해 본 연구에서는 2 가지 사항에 초점을 맞춰 연구를 진행했다. 첫째, 높은 각도 및 높은 반복 변형 횟수에서의 피로 파괴 특성에 관해 연구를 진행했다. 반복 비틀림 변형을 받는 박막소자에서 발생하는 피로 파괴에 대한 기초적인 연구를 진행했다. 둘째, strain/stress 분포 분석 및 정량화 방법을 연구했다. 기존 비틀림 각도로 표기하는 방식을 strain으로 대체하고자, FEM simulation 과 analytic model 통해 비틀림에 따른 strain을 정량화하고 분포를 확인했다.

#### 1.4. 본 논문의 구성

본 논문은 총 5개의 장으로 이루어졌다. 2장에서는 이론적 배경을 살펴보았다. 비틀림 피로 거동을 이해하기 위해 반복 strain/stress 효과 및 이에 따른 피로 파괴 현상에 대해 설명했다. 3장에서는 비틀림 실험 방법을 다루었다. 실험을 진행하기 전에 비틀림 장비 설계 과정을 설명했고, 사용한 샘플과 실험 조건을 명시했다. 또한 FEM simulation을 이용해 strain/stress 값을 구할 때 사용한 모델을 나타냈다. 4장에서는 진행한 실험에서의 결과들을 나열했으며 이에 대해 논의 하였다. 전기적 저항 변화 데이터를 통해 피로수명을 얻었다. 변수에 따른 피로 수명 차이를 피로손상 이미지와 strain/stress 값과 비교해가며 박막형 샘플에서의 비틀림 피로 거동을 분석하였다. 마지막 5장에서는 결과들을



요약하고 비틀림 변형에서 피로 손상을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 물질의 피로거동

피로거동을 뜻하는 fatigue란 반복적인 하중에 의한 물질의 특성이 변하는 것을 의미한다 [2.1-2.2]. 물질의 특성 변화는 최종적으로 물질의 파손을 야기한다. 피로 파괴는 ductile, brittle, non-crystalline 물질들마다 다른 형태로 발생하고 온도나 여러 환경에 영향을 받는다. 피로 파괴는 반복 하중의 가장 큰 값이 작용하는 지점에서 발생하는데 이 하중은 실험적으로 얻은 비교적 안전한 하중 이하 값의 범위에 속한다. 피로거동에 대한 연구의 시작은 19세기까지 거슬러 올라가고, 물질의 변형과 파괴 연구와 같이 발전하여 재료과학의 하나의 분야를 차지하고 있다. 현재 유연소자의 개발과 함께 반복 하중이 중요 구동 조건이 되어 피로거동 신뢰성 평가의 중요성은 다시 부각되고 있다.

피로 손상은 보통 3 가지 현상으로 설명된다 [2.3]. 첫째로는 물질의 연화/경화와 미세구조의 변화, 둘째로 미세 크랙의 발생, 마지막 셋째는 물질 손상에 직접적인 영향을 주는 치명적인 크랙의 발생 및 전파가 3가지 현상이다. 따라서 피로수명은 피로 크랙이 발생하고 전파되어 물질의 실질적 파손이 일어날 때까지의 가해진 반복 하중 횟수로 정의할 수 있다.

#### 2.1.1 응력 제어 피로 실험

응력제어 피로 실험은 1860년에 Wöhler가 최초로 시행했다 [2.4]. 이

방법은 elastic 변형을 발생시키는 상대적으로 낮은 응력 실험 조건 범위에서 적용 가능하다. 이 조건은 high cycle fatigue (HCF) 라고 불린다. 아무리 낮은 응력이더라도 이 조건에서도 국부적인 영역에서 plastic 변형이 일어난다. 피로 수명에 영향을 주는 응력을 Fig 2.1에 표현했다. 응력 범위  $\Delta\sigma$ , 응력 폭  $\sigma_a$ , 평균 응력  $\sigma_m$ , 하중 비율 R은 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

여기서  $\sigma_{max}$  와  $\sigma_{min}$  은 각각 최대, 최소 응력을 의미한다. 응력 폭  $\sigma_a$ 을  $N_f$ 에 대해 그려보면 Fig. 2.2와 같다. Fig. 2.2의 그래프에서  $\sigma_a$ 는  $2N_f$ 의 관한 식으로 나타낼 수 있는데 이를 Basquin 식 이라고[2.5] 말하고 아래의 식으로 표현한다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma_f' \cdot (2N_f)^{C_s}$$

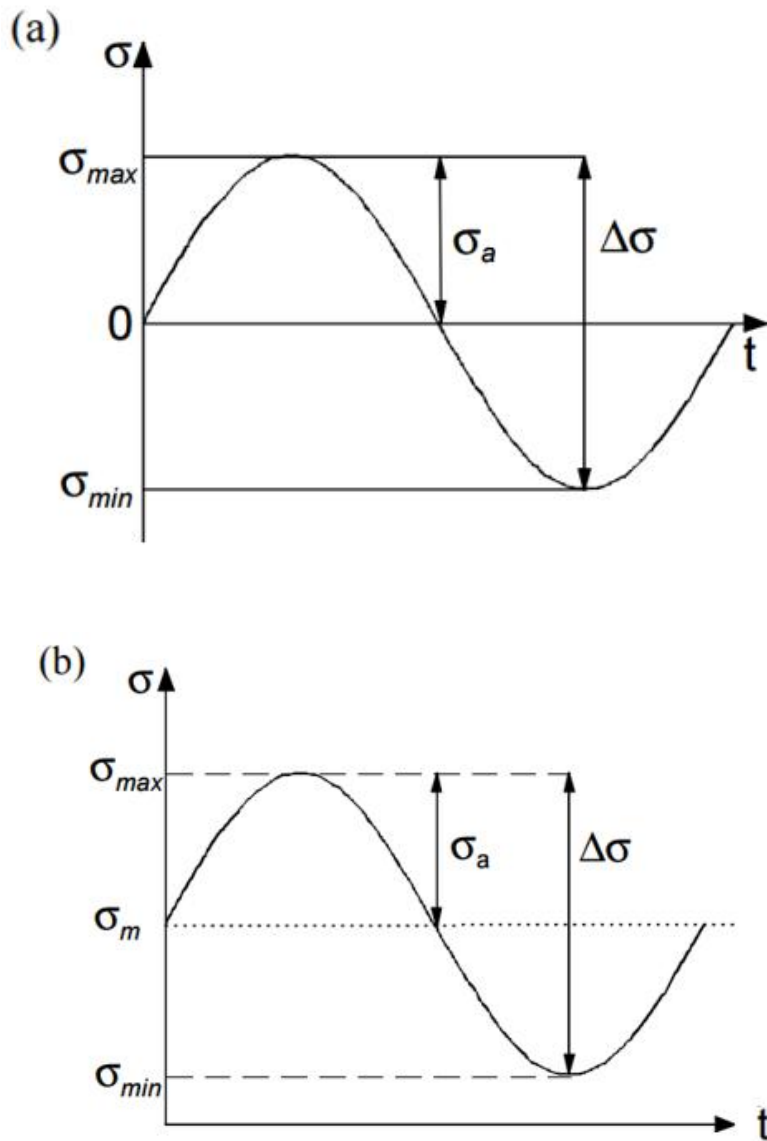


Figure. 2.1 Stress parameters. In one cycle mean stress is (a) zero and (b) non-zero mean stress.

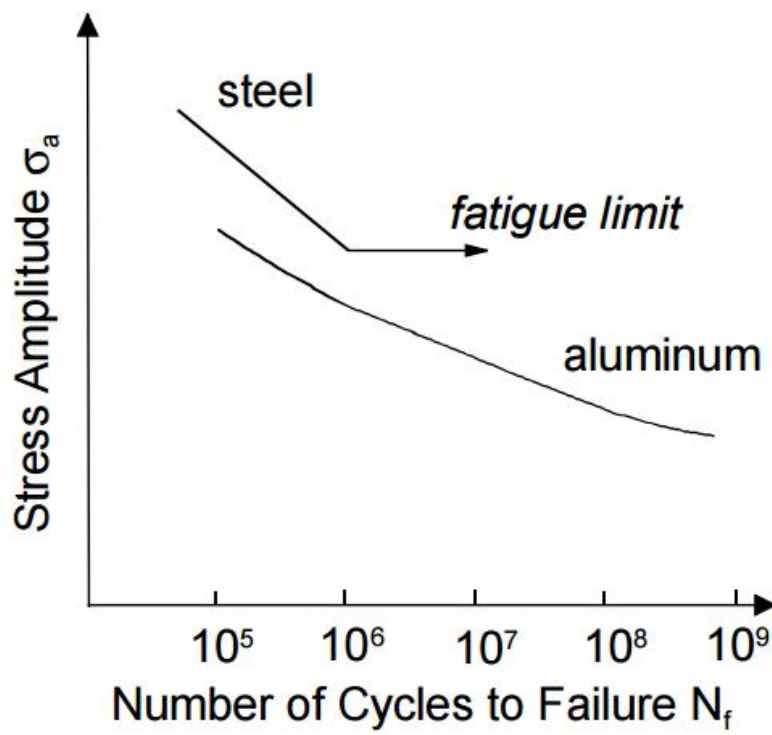


Figure. 2.2 Diagram of  $\sigma_a$ - $N_f$  with different materials.

여기서  $\sigma_f'$ 는 fatigue strength 상수를 의미하고  $C_s$ 는 fatigue strength 계수를 의미한다. Fatigue strength 계수는 보통  $-0.05$ 에서  $-0.12$ 의 값의 범위를 갖는다 [2.6].

하지만 위 경우에는 평균 응력 값이 0 일 때 인데, 이는 실생활에 적용분야가 많지 않다. 보통의 경우에 평균 응력은 0 이 아닌 값이고 로거동에 큰 비중을 차지한다. 이를 cyclic creep이라고 하며 plastic 변형이 매 cycle마다 축적이 되어 발생한다. Marrow 는 위 Basquin equation을 좀 더 실용적으로 사용하기 위해 아래와 같이 식을 수정했다 [2.7-2.8].

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = (\sigma_f' - \sigma_m) \cdot (2N_f)^{C_s}$$

### 2.1.2 변형률 제어 피로실험

위에서 소개한 HCF 영역과 반대되는 영역으로 low cycle fatigue (LCF) 영역이 있다. 이 영역에서는 큰 plastic 변형이 반복 하중 중에 가해져 피로 수명이 매우 짧다. 예를 들면, 높은 응력이 가해지거나 응력이 집중되는 경우이다. 이 영역을 Basquin equation과 같이 표현한 식은 Coffin-Manon equation 이다. 이 식은 plastic strain과 피로 수명간의 관계를 나타낸 식으로서 아래와 같이 표현 가능하다 [2.9-10].

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^{C_d}$$

이 식에서  $\varepsilon_f'$ 은 fatigue ductility 상수를 의미하고  $C_d$ 는 fatigue

ductility 계수를 의미한다. 보통 금속에서  $C_d$  값은  $-0.5$ 에서  $-0.7$  값을 갖는다.[2-6] 일정한 strain을 가해주는 실험에서의 총 strain,  $\epsilon_a$  는 elastic strain 값,  $\epsilon_{ae}$ 과 plastic strain 값,  $\epsilon_{ap}$ 의 합으로 나타낸다.

$$\epsilon_a = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap}$$

이 때 strain은  $\epsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E}$  이므로 Basquin equation을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ae} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^{C_s}$$

위의 Basquin equation과 Coffin Manson equation을 합하면 총 strain 값을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^{C_s} + \epsilon_f' \cdot (2N_f)^{C_d}$$

위 식을 표현한 그래프가 Fig. 2.3에 실려 있다. 우변에서의 첫번째 항은 elastic strain 요소이고, 두번째 항은 plastic strain 요소를 의미한다. 각각의 영역은 Fig. 2.3에 표시되었으며, LCF 구간에서는 plastic strain이, HCF 구간에서는 elastic strain이 dominant하여 각각 요소들로만 총 strain 값을 근사할 수 있다. 하지만 transition 구간에서는 두 strain 값을 고려한 총 strain 값을 사용해야 한다. LCF 영역에서는 ductility에 의해 피로 수명이 조절되고 HCF 영역에서는 물질의 강도에 피로수명이 큰 영향을 받는다.

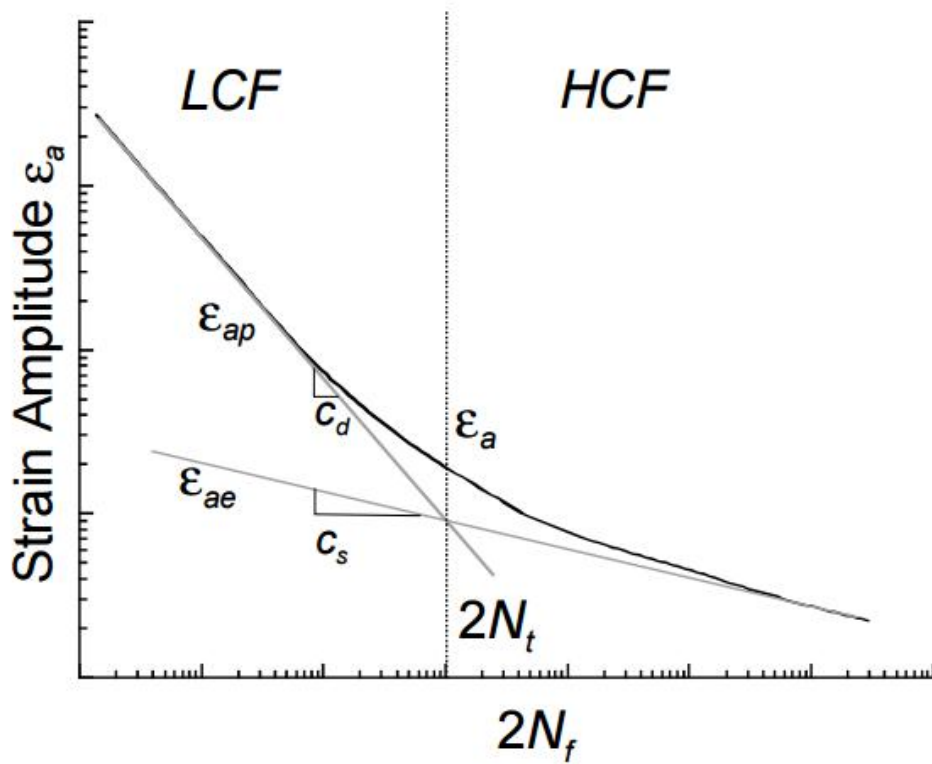


Figure. 2.3 Strain amplitude vs. fatigue lifetime. Total strain ( $\epsilon_a$ ) is composed of elastic ( $\epsilon_{ae}$ ) and plastic strain ( $\epsilon_{ap}$ ). Strains are plotted as functions of the  $N_f$  and these parameters have reversal relation.



### 2.1.3 물질의 피로 파괴

단결정 fcc 구조를 갖는 금속에서, 반복 변형은 물질의 경화를 일으킨다. 경화 (hardening)는 변형이 반복적으로 가해질수록 같은 strain에서 발생하는 stress가 점점 커지는 현상이다. 경화 과정은 stress-strain의 변화로 정량화 할 수 있다. 단결정에서 반복 변형은 shear stress  $\tau_r$  과  $\gamma_r$  를 사용하여 Fig. 2.4a와 같이 주로 표현한다. Fig. 2.4a에서  $\tau_s$  는 최대 응력을 의미하고 총 가해진 strain은  $\gamma_s$  로 나타냈다. Cyclic stress-strain (CSS) 곡선은 처음 Mughrabi [2.11]에 의해 실험적으로 얻어냈다. Fig. 2.5b에서의 곡선 변화 형태는 주로 Cu, Ni, Ag, Al 과 같은 단결정 fcc 물질에서 보이는 거동이다. Fig. 2.4b에서 나타난 것과 같이 CSS 곡선은 3개의 영역으로 나눌 수 있다. A 영역은 낮은 plastic strain에서 발생되고 dislocation구조가 edge dislocation dipole들의 축적을 통해 만들어진다. Vein이라고 불리우는 초기 glide 면에 dislocation 구조가 만들어지고 dislocation이 적은 영역과 나누어진다. 초기 피로 거동에서 vein은 부분적으로 물질의 경화를 일으킨다. B 영역은 샘플의 표면에 slip band를 형성한다. Slip현상은 형성된 band를 따라 집중적으로 발생한다. 이 때 발생하는 slip line들을 persistent slip band (PSB)라고 한다. PSB구조에서 dislocation의 배열은 주변의 vein과 같은 구조와 다르다. PSB 구조는 Fig. 2.5에 묘사되었다. 마지막으로 높은 strain 영역인 C 영역에서는 cell 구조를 형성한다. 영역 B에서 C로의 변화는 PSB가 더 이상 plastic 변형을 동반하지 않을 때 일어난다. 이 영역에서는 초기 slip보다는 secondary slip이 더욱 중요하다.

표면에서의 extrusion 형성은 edge dislocation들의 slip 과정을 포함한다. PSB-matrix의 계면에 vacancy들이 이동하여 밀집되면

계면에서의 dislocation이 발생하게 되고 응력을 주면 glide가 발생하여 샘플 표면에 extrusion을 발생시킨다. Extrusion의 높이는 glide의 길이나

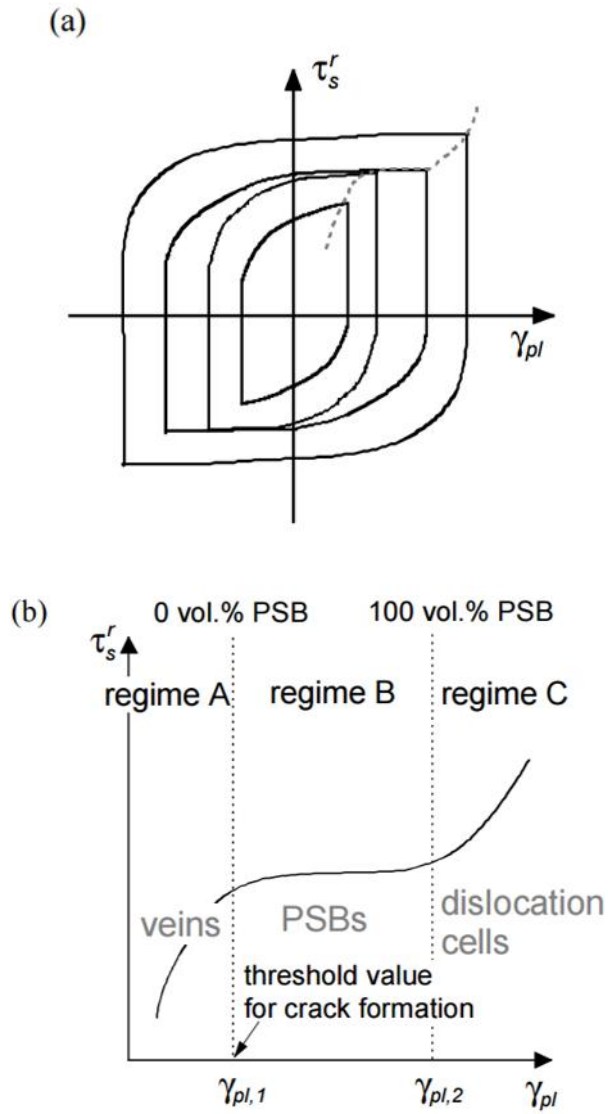


Figure. 2.4 (a) Hysteresis loop of  $\tau_r$ - $\gamma_s$ . (b) CSS curve of fcc single crystals. This curve is plotted from the tips of the stable loops.

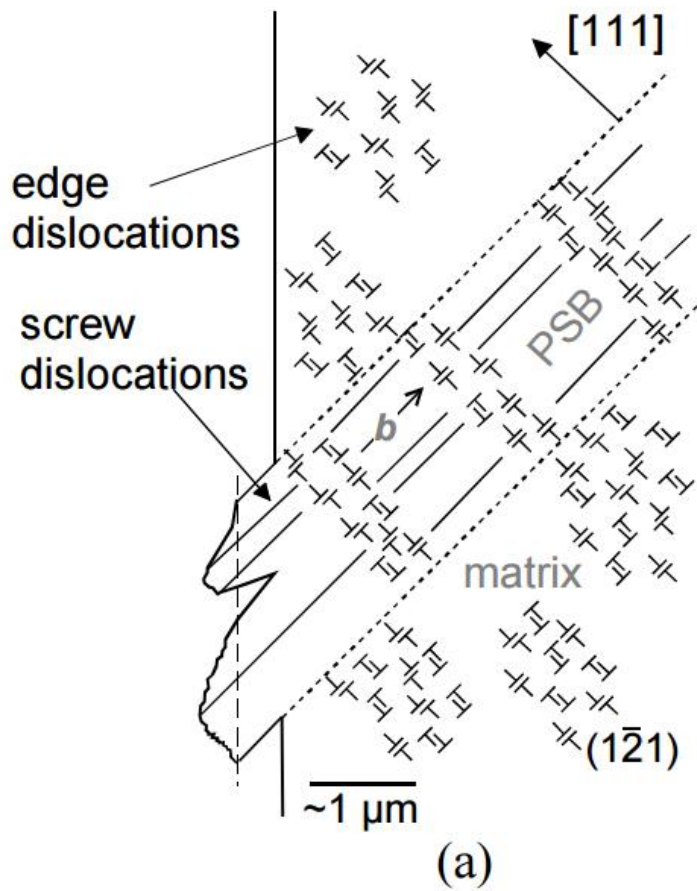


Figure. 2.5 Schematic of PSB structure. Dislocations arrange in  $(1\bar{1}1)$  section and form the vein structures and PSB wall.

샘플 크기, 그레인 크기, vacancy 농도의 포화 정도 등에 영향을 받는다. Extrusion과 같은 surface roughening이 발생하면 그 지점에서 국부적인 응력 집중 현상이 일어나고 국부적인 크랙이 발생하여 점차적으로 전파된다.

### 2.1.4 박막 물질의 피로거동 효과

박막에서의 피로 특성은 벌크형 물질에서의 피로 특성과 다르다. 그레인의 지름은  $1\ \mu\text{m}$  이하의 박막의 두께와 같은 값의 단위를 갖기 때문에 국부적인 변형은 매우 중요하다. 박막형 구조에서는 dislocation구조가 반복 변형 동안 특정 치수에 한정되기 때문에 벌크형과 차이가 있고, 무엇보다도 박막형에서는 부피 대비 표면의 비율이 커서 거의 모든 그레인이 free surface라는 큰 차이점이 있다.

박막형 물질에서는 더 높은 항복 응력을 보인다 [2-12]. 또한 계면이나 표면, 결정립계들은 dislocation의 형성과 움직임을 방해하여 더 높은 strength를 보인다. 피로 하중에서 국부적인 plastic strain의 축적도 박막의 두께에 영향을 받는다. Dislocation 구조인 vein, slip band, cell들은 마이크로 단위에서 쉽게 형성이 되지만, 박막형에서는 벌크형에 비해 부피가 매우 작기 때문에 전형적인 dislocation 구조를 보이기 힘든 경우가 많다.

## 2.2. 비틀림 변형에서 응력 분포

비틀림 변형은 해당 해당 샘플에 길이방향 축에 대하여 회전을 일으키는 모멘트, 토크를 의미하는 변형이다. 순수 비틀림이 가해지면 샘플의 모든 단면이 같은 내부 토크가 작용하게 된다. 원형 봉형 샘플에

순수 비틀림이 가해지고, 왼쪽이 고정된 채로 반대쪽 면에 비틀림이 가해질 경우 모든 단면은 평면과 원형으로 남게 되고, 모든 반지름은 직선을 유지하며, 회전각은 양 끝 사이에서 선형적으로 변하게 된다. 바깥 표면에서의 전단 변형률은 아래와 같이 나타낼 수 있다 [2-13].

$$\gamma_{max} \cong \frac{rd\theta}{dx} = r\theta \left( \theta \equiv \frac{d\theta}{dx} = \frac{\theta}{L} \right)$$

여기서  $r$ 은 원형 단면의 반지름을 의미하고,  $\theta$  는 비틀림 각도,  $x$  는 길이를 의미한다. 위 식을 이용하여 원형 단면 내부의 전단 변형률도 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\gamma = \rho\theta = \frac{\rho}{r}\gamma_{max}$$

여기서  $\rho$  값은 원형 단면 중심으로부터 반지름 방향의 거리를 의미하며, 단면 중심에서는 shear strain이 0이고 표면에서  $\gamma_{max}$  값을 갖는다. 순수 전단 상태에서 응력은  $45^\circ$  방향의 tension/compression과 동일하다. 물질이 ductile할 경우 길이와 수직방향으로 파단이 발생하지만 brittle한 물질일 경우  $45^\circ$  방향의 단면을 형성하며 파단이 발생한다. 비틀림 변형을 이야기 할 때 보통 봉상 형태의 샘플을 대표로 설명을 하지만, 비틀림에서는 샘플의 단면 모양에 따라 같은 비틀림 변형에서도 발생하는 응력이 다르다. 때문에 실험하고자 하는 샘플의 단면 모양이 어떤 모델과 가까운지를 고려하고 선택하여 값을 계산해야한다. Fig. 2.6a에서는 각 단면에 따른 응력 식을 나타내고 있다.

본 연구에서는 박막형 샘플을 사용하기 때문에 plate model을 택하였다.

Plate 모델은 rectangular cross section을 가진다. 코너 부분에서는 distort가 일어나지 않고 코너 부분에서의 각도는 유지가 되기 때문에 이 부분에서의 shear strain은 0이 된다. 응력 분포는 Fig. 2.7과 같은 형태로 나타난다. 각각의 가장자리와 모서리 부분에서 shear stain이 0이 된다. 이 모델에서 최대 shear strain/stress 값은 직사각형에서 긴 변의 중심 부분에서 발생한다. 여기서 K와 C<sub>1</sub>값은 b/t 값이 10 이상일 때 0.33으로 동일한 값을 갖는다.

토크  $M_x$ 에 의한 최대 shear strain 및 비틀림 각도는 아래 식과 같이 표현한다.

$$\tau_{max} = \frac{M_x}{Kba^2}$$

$$\theta = \frac{M_x L}{C_1 ba^3 G}$$

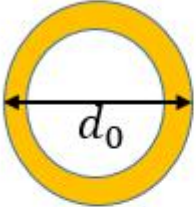
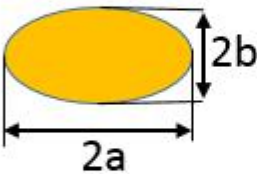
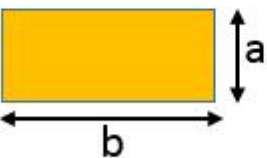
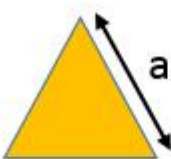
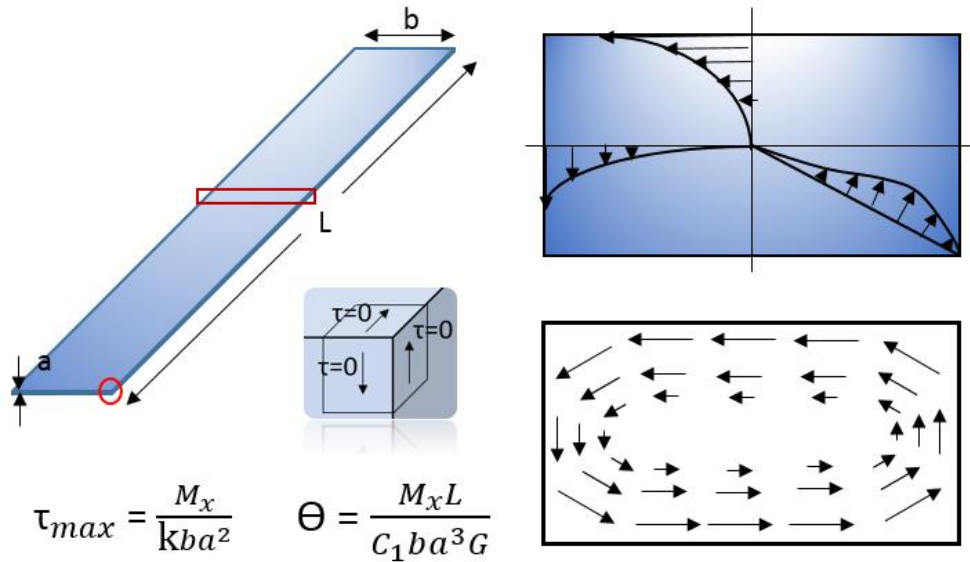
Shape factor	
Cross sections	$\tau_{max}$
	$\frac{16M_x}{\pi d_0^3}$
	$\frac{2M_x}{\pi ab^2}$
	$\frac{M_x}{kba^2}$
	$\frac{20M_x}{a^3}$

Figure. 2.6 Maximum shear stress equation with different cross section of the sample.





**Figure. 2.7 Maximum shear stress equation with different cross section of the sample. At corner and edge of the sample, shear strain is 0 and maximum shear strain is at the center of the longer line**

### 3. 실험방법

#### 3.1. 비틀림 장비 설계 및 제작

초기 장비 설계 시 2 가지를 우선순위로 고려했다. 첫째로는 한 지그 위에 로딩한 샘플에서 위치 별 실시간 저항 측정이 가능하도록 하는 것이었다 [3.1]. 위의 이론적 배경에서 이야기 했듯이, 필름형 샘플에서의 비틀림 변형에 따른 스트레스는 샘플의 너비 방향으로 불균일한 분포를 보이기 때문에 같은 비틀림 변형을 받더라도 전기적 저항 변화 정도가 다를 것으로 예상했다. 샘플의 다른 위치에서의 전기저항 측정이 개별적으로 가능하도록 설계했다. 두번째 고려사항은 동일한 실험 조건을 동시에 수행할 수 있도록 하는 것이었다. 신뢰성 측정에서 중요한 요건 중 하나는 충분한 데이터 수 확보이다. 신뢰성 측정에서 초기 failure에 의한 피로 수명을 보이는 경우도 있고 평균 수명보다 높은 수명을 보이는 경우도 있다. 이러한 수명 피로 분포를 통계적으로 처리하기 위해서는 데이터 수가 충분히 많아야 한다. 실험시간 단축을 위하여 한번의 실험으로 동일한 평가 조건에서의 피로 특성 데이터를 얻을 수 있도록 설계했다. 총 3개의 지그를 하나의 회전 모터에 벨트로 연결하여 동일한 실험 조건을 구현 가능하게 설계했다.

위 고려사항들을 반영하여 Fig. 3.1과 같이 개발하였다. 샘플 위 위치에 따른 전기저항 측정을 위해 3개의 개별적인 고정 전극을 지그 위에 올렸다. 이를 통해 샘플의 위치 고정 및 전극과 전도체의 접촉을 통한 실시간 저항 측정이 가능했다. 동일한 모터에 3개의 벨트를 이용하여

각각의 지그에

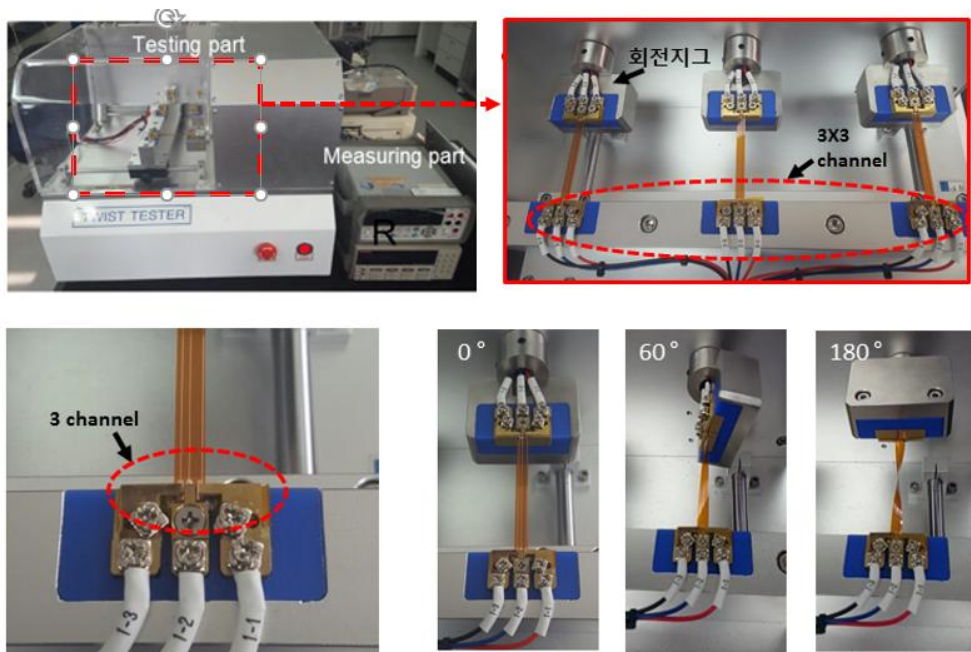


Figure. 3.1 Developed twisting tester In-situ measurement of resistance change is possible by connecting the measuring part to tester. 9 data of electrical resistance change by twisting can be obtained in one set of test..

연결하였고 동일한 비틀림이 가능하도록 하였다. 총 3개의 지그 위에 각각 3 개의 컨택 전극을 장비하여 한 실험당 9개의 데이터를 동시에 얻을 수 있었다. 이외에도 샘플의 치수에 제한을 두지 않기 위해 지그의 위치를 이동시킬 수 있게 개발했고 지그도 디자인한 샘플보다 넓게 제작하였다.

### 3.2. Sample 설계 및 제작

금속 배선은 유연소자에서 전도체로서 배선 및 전극으로 많이 활용된다. 금속 물질은 소자 전체 영역에 분포하고있으며, 소자의 성능에 직접적으로 영향을 준다. 이러한 이유로 비틀림 피로거동 실험에서 폴리머 물질을 기판으로 하는 금속 구리 배선을 사용했다. 기판은 내열성 내화학적 등이 높아 외부환경에 안정성이 높은 polyimide (Dupont, Kapton) 기판을 사용했다. PI기판의 두께는  $125\ \mu\text{m}$ 이다. 구리 금속 박막은 thermal evaporator로 증착속도  $0.8\ \text{nm/s}$ 를 유지하며 증착했다. 더 선명한 피로 손상을 보기 위해 박막 두께는 비교적 두꺼운  $1\ \mu\text{m}$  두께로 증착했다.

초기에는 너비가 6 mm인 필름형 구리 박막에 대해 관찰했다 Fig. 3.2a 필름형 샘플을 사용할 때 각 위치별 전기저항 변화를 측정하기엔 어려움이 있었다.

기판 위 위치에 따른 비틀림 피로거동 차이 효과를 좀 더 명확하게 보기 위해, PI 기판 위에 여러 위치에  $200\ \mu\text{m}$  너비의 line형 Cu 물질을 패터닝 했다 Fig. 3.2b 기판의 너비를 x축으로, 길이방향으로 y축으로, 높이 방향을 z 축으로 설정했다. 기판의 x축 방향에서 중심 위치를  $x = 0\ \text{mm}$ 라고 정의했다.  $X = 0\ \text{mm}$ 에는 회전축이 위치하게 된다. 이 위치를 기준으로  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 4.5\ \text{mm}$ 에 line 형 Cu를 증착했다.

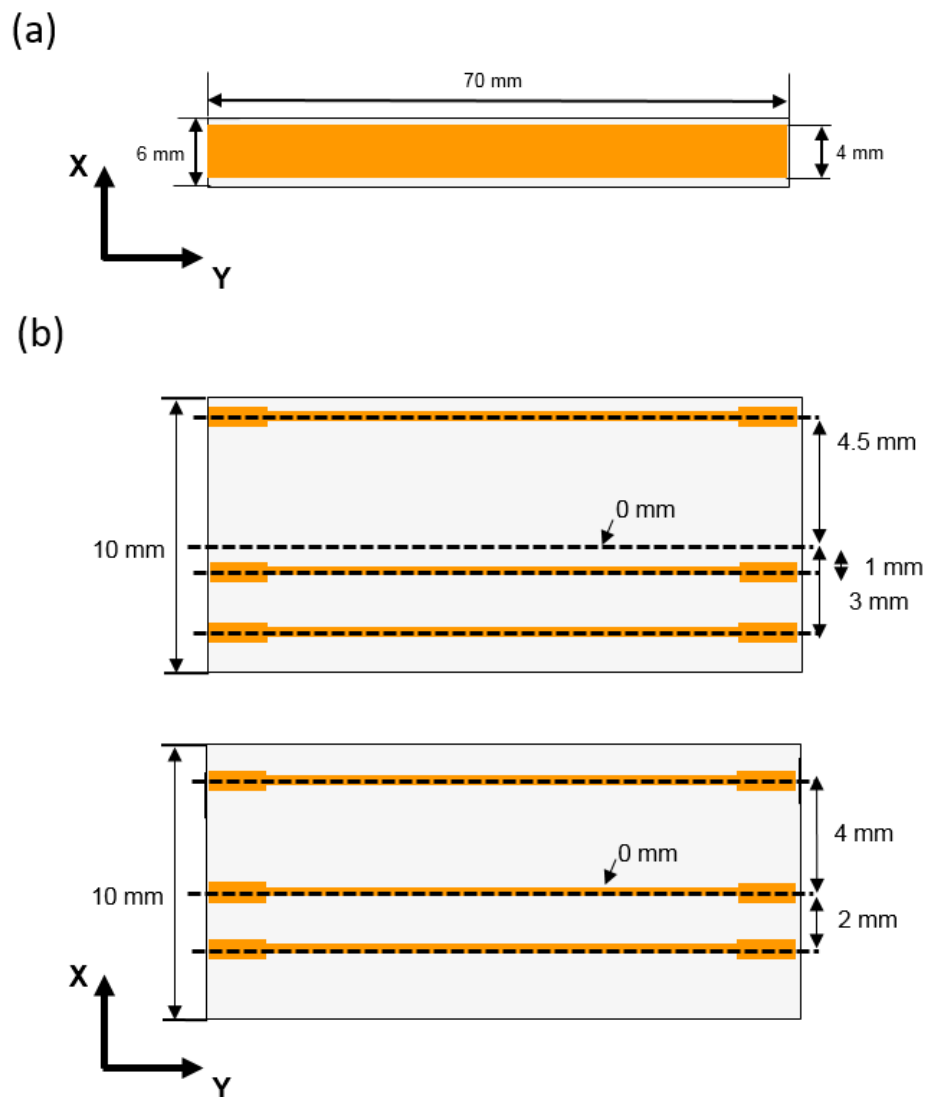


Figure. 3.2 Schimatics of samples. (a) Film type and (b) line type Cu on PI substrate.

### 3.3. 비틀림 피로 실험

비틀림 실험을 진행 할 때 고려해야하는 조건이 굽힘 및 당김 실험보다 다양했다. 굽힘 실험에서는 굽힘 반경, 샘플의 치수 및 두께 만으로도 변형률을 구할 수 있다. 하지만 비틀림 실험에서는 샘플의 치수 및 비틀림 각도 뿐 아니라, 회전축의 위치와 샘플 간의 수직 수평 거리, 샘플의 모양, 너비와 길이의 비율 등 변형률에 영향을 주는 요인이 상당히 많다 [3.2-3.3]. 모든 조건을 보기 위해선 많은 시간이 들기 때문에 두가지 변수에 집중하였다. 샘플의 치수 및 사용 조건이 모두 정해졌다고 했을 때, 조절 할 수 있는 변수는 active area의 기관 위 위치라고 생각했다. 따라서 이러한 상황에서 비틀림 변형에서의 디자인 룰을 제시하기 위해 비틀림 변형에서의 기관 위 위치에 따른 피로 거동 변화에 대해 초점을 맞춰 실험을 진행하였다. 3.2 에서 설명한 샘플들을 사용했고 비틀림 각도를  $\pm 90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  변화시켰다. 여기서  $\pm$  부호의 의미는 비틀림 각도의 방향을 의미한다. +는 시계방향, - 는 반시계 방향을 의미한다. 비틀림 속도는 30 cycles/min 로 설정했고 두 지그의 위치를 고정하여 실험을 진행하였다. 비틀림 실험 진행동안 전기 저항 측정을 동시에 진행하였으며 실시간으로 비틀림 횟수에 따른 전기저항 변화값을 확인 할 수 있었다.

### 3.4. FEM simulation을 통한 응력 분포 및 변형률 계산

비틀림 각도 및 구리 배선의 기관 위 위치에 따른 영향을 정량화하기 위해서는 변수에 따른 strain 값을 알아야 했다. 여러 변수를 입력해야

하고 non-linearity를 보이는 큰 변형이 포함되었기 때문에 FEM simulation (ABAQUS)를 이용하여 각 변수들의 변화에 따른 stress/strain 값을 얻어냈다. FEM simulation 결과를 얻기 전에 modeling을 해야하는데 사용한 model은 Fig. 3.3에 나타냈다. Modeling을 하기 전 2가지를 가정했다. 첫째, PI와 Cu 물질은 homogenous하고 continuum한 물질이다. 샘플 전체는 균일한 물질이고 continuum하기 때문에 변형에 따른 stress 집중 되는 영역 없이 동일하게 가해짐을 가정했다. 둘째, Cu 배선의 두께는 매우 얇기 때문에 PI 기판의 변형을 그대로 따름을 가정했다. 이에 따라 PI 기판만을 모델로 세워 계산을 진행하였다.  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  를 model의 한 쪽 면에 UR2로 가했다. 이때 회전축은 기판의 yz 면의 중심에 위치시켰다. 또한 실험에서 두 지그의 위치를 고정했기 때문에 model의 y축으로의 변위를 0으로 설정했다. Simulation에서 각 위치 및 각도 별 스트레스

값을 얻어냈고 이를 strain으로 환산했다.



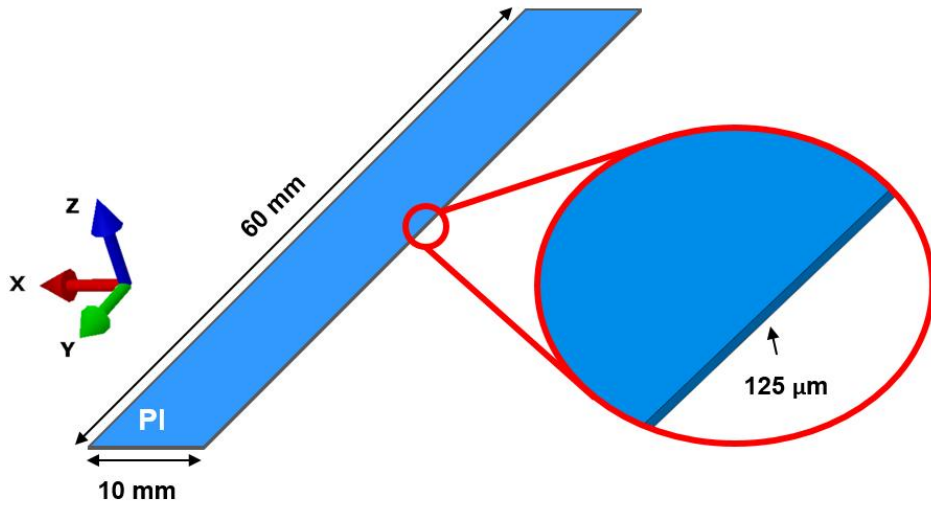


Figure. 3.3 Modeling for FEM simulation. Model is represent for the only PI substrate.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 필름형 구리의 비틀림 피로 거동

필름형 구리에서의 비틀림 피로거동에서는 각 지그당 하나의 전극을 사용하여 전체 전기저항 변화를 측정했다. 필름형 샘플은  $\pm 180^\circ$  각도에서 실험을 진행하였다. Fig. 4.1에서 보면 비틀림 반복 횟수가 증가함에 따라 저항이 점차적으로 증가함을 볼 수 있다. 비틀림 반복 변형에 따라 피로 손상이 발생하고, 이는 전자의 이동에 방해를 주기 때문에 변형 횟수 증가에 따라 저항이 점차적으로 증가한다.

전기저항 변화를 필름의 크랙과 연관시키기 위해 OM 및 SEM 사진으로 표면 손상을 관찰했다. 5만번 비틀림 변형 후 OM (Fig 4.2a) 이미지를 보면 y축 방향으로의 손상 정도는 차이가 없음을 확인했다. 필름의 x 축 방향으로 표면 손상 정도와 방향이 다름을 확인할 수 있다.

좀 더 자세히 표면 손상을 관찰하기 위해 Fig. 4.2b와 같이 SEM을 통해 이미지를 얻었다. 필름의 가장자리 영역은 x축 방향의 수평형 피로손상 및 크랙이 많이 관찰되었다. 필름의 중앙 부분에서는 수평형 피로 손상이 주를 이루었으나 교차형 크랙도 종종 관찰 되었다. X축 방향으로 가운데 지점을 기준으로 변형이 대칭이기 때문에 반대편에서의 필름 손상 모양이 동일했다. 필름의 가운데와 가장자리 중간 영역에서는 십자형으로 교차되는 피로 손상 및 크랙이 관찰 되었다. 이를 통해 필름의 회전축으로부터 거리가 달라지면 dominant한 stress/strain 요소가 달라지고 값 또한 달라짐을 유추할 수 있다. 하지만 필름형으로 관찰할 때

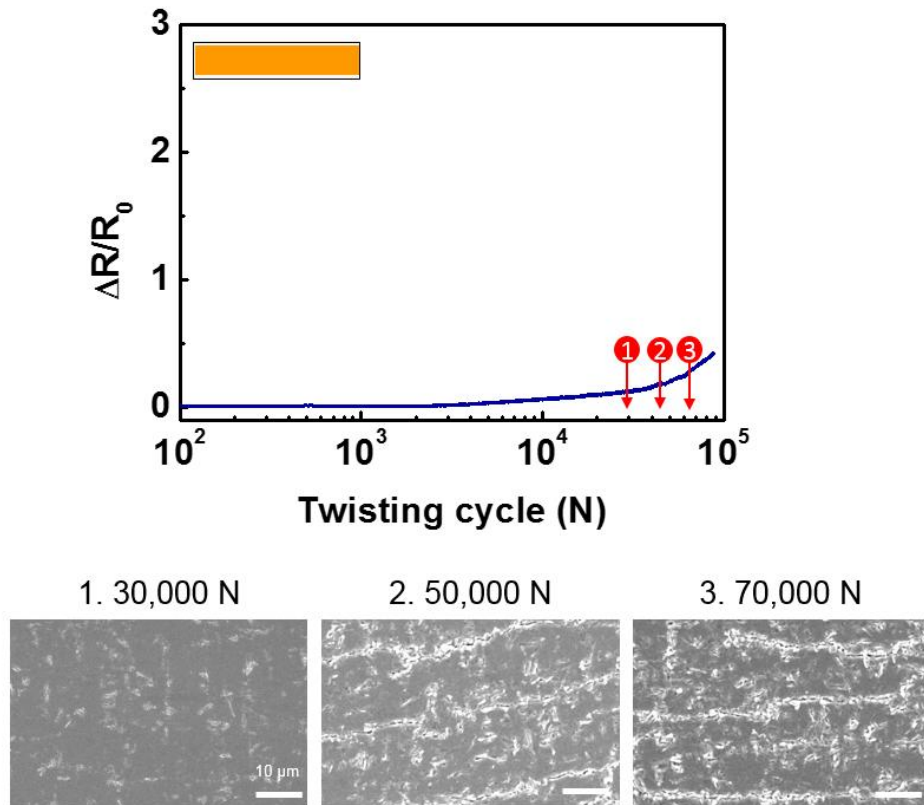


Figure. 4.1 Resistance change by cyclic twisting in film type sample.

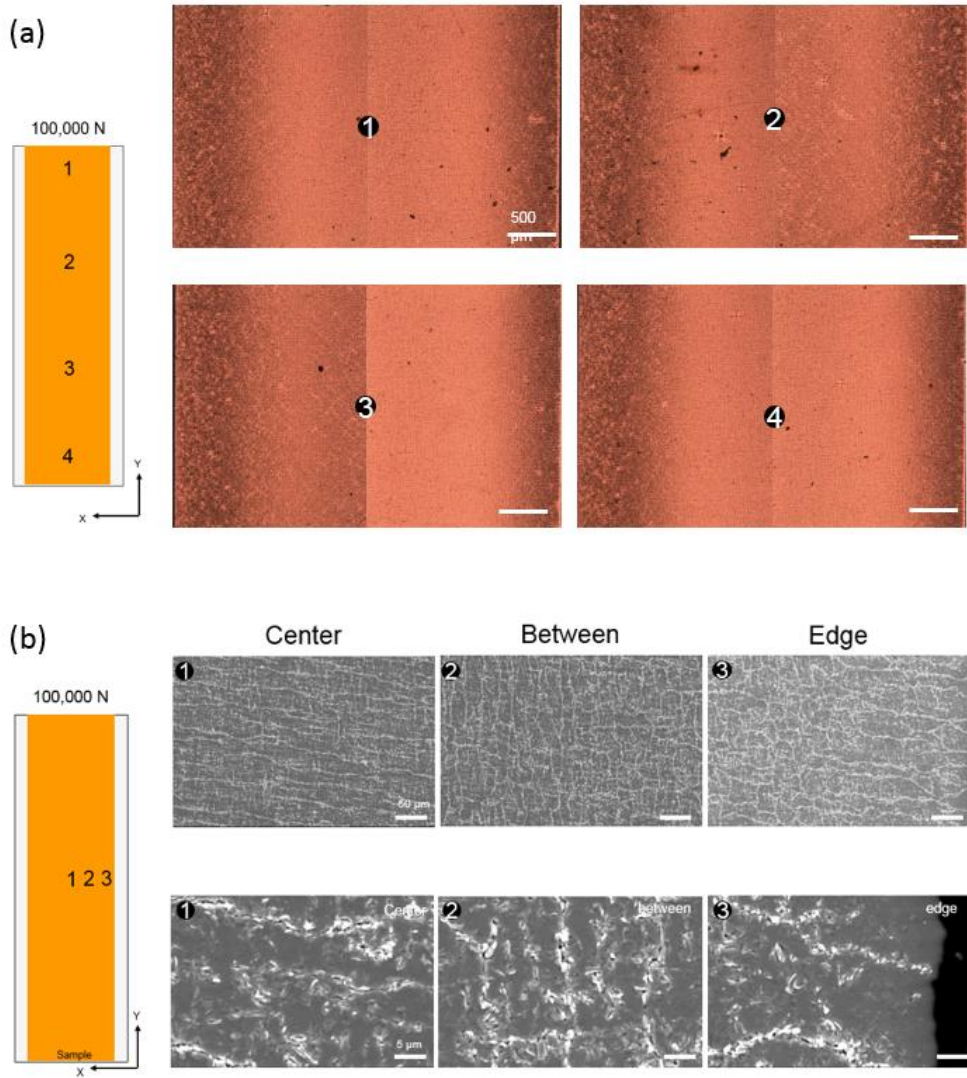


Figure. 4.2 Damage morphologies on surface of the film type sample by (a) OM along the y direction and (b) SEM along the x direction.

위치별로 전기저항을 얻어내기 힘들고, 주변 크랙 전파 영향으로 특정 영역에서의 손상 정도를 파악하기 힘든 한계 점들이 있기 때문에 각 위치별 라인형 배선 샘플로 동일한 실험을 재개했다.

## 4.2 배선형 구리의 비틀림 피로 거동

배선의 위치를  $x = 0$  mm (회전축)을 기준으로  $x = 1, 2, 3, 4, 4.5$  mm의 위치에 증착된 배선들의 저항을 각각 측정하며 비틀림 실험을 진행하였다. 첫번째 실험은 위치 변수에 따른 피로거동 차이를 보기 위해  $\pm 180^\circ$  각도 조건하에서 진행하였다. Fig. 4.3a에 각 위치별 저항 변화를 나타낸 그래프가 나와있다.  $X = 0$  mm의 위치로부터 멀리 떨어진 배선일수록 저항증가가 더 낮은 변형 횟수에서 일어남을 확인 할 수 있었다.  $X = 0$  mm에서 가장 느린 저항 변화를 보였고  $x = 4.5$  mm에서 가장 빠른 저항 변화를 보였다. 각 위치에서의 저항증가 ( $\Delta R/R_0$ )가 5%에 도달했을 때의 비틀림 변형 횟수를 failure criteria로 설정했다 [4.1-4.2]. 피로수명을 얻기 위해 각각의 위치 조건 별로 3-5 개의 샘플 데이터를 수집하여 통계처리를 진행하였다 (Fig. 4.3b). 이때 y축은 cumulative failure, x축은 failure cycle 값이다. 각각의 데이터들을 하나의 선으로 fitting 하였고, 이 linear 선의 cumulative failure값이 50에 도달한 시점에서의 failure cycle 값이 평균 피로 수명이라고 할 수 있다. 각 위치별 피로수명을 이와 같은 방법으로 구하면 Tab. 4.1의 값과 같이 나온다. 피로수명이  $x = 0$  mm에서 10,200 회로 가장 길게 나타났고  $x = 4.5$  mm에서 80 회로 가장 짧은 수명을 보였다, 배선의 위치가 기관의 중심에서 가장자리로 갈수록 피로 수명의 감소가 매우 컸다. 어떤 stress

component가 피로 수명의 현저한

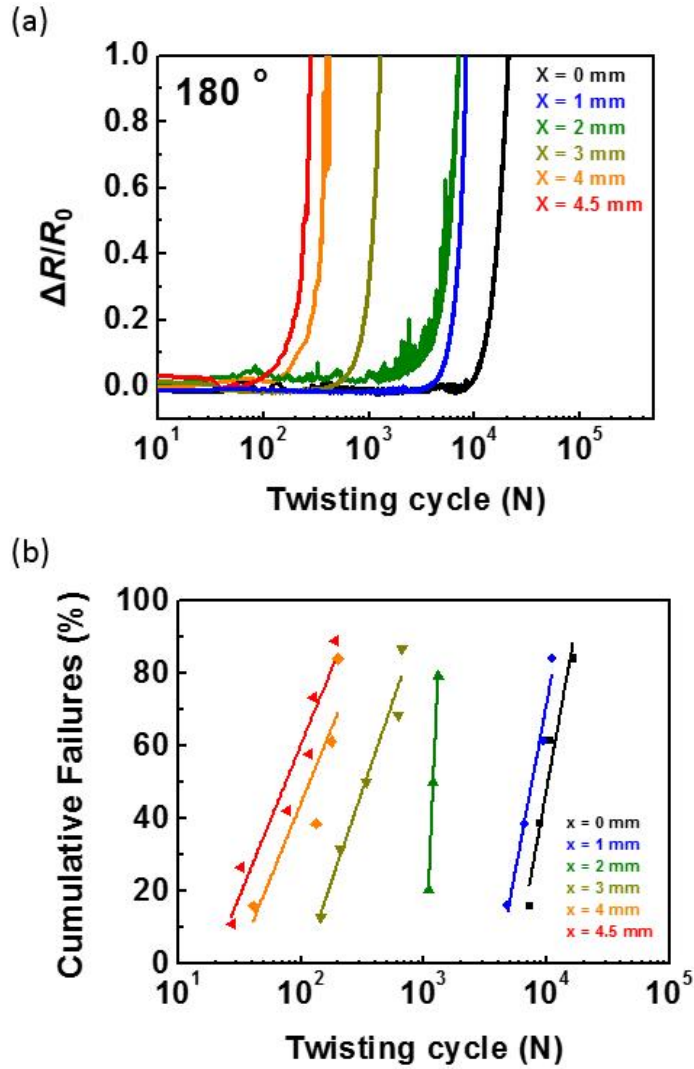


Figure. 4.3 (a) Resistance change of Cu line by cyclic twisting with different position on PI substrate. (b) Cumulative probability vs. failure cycles for fatigue lifetime of each of the position.

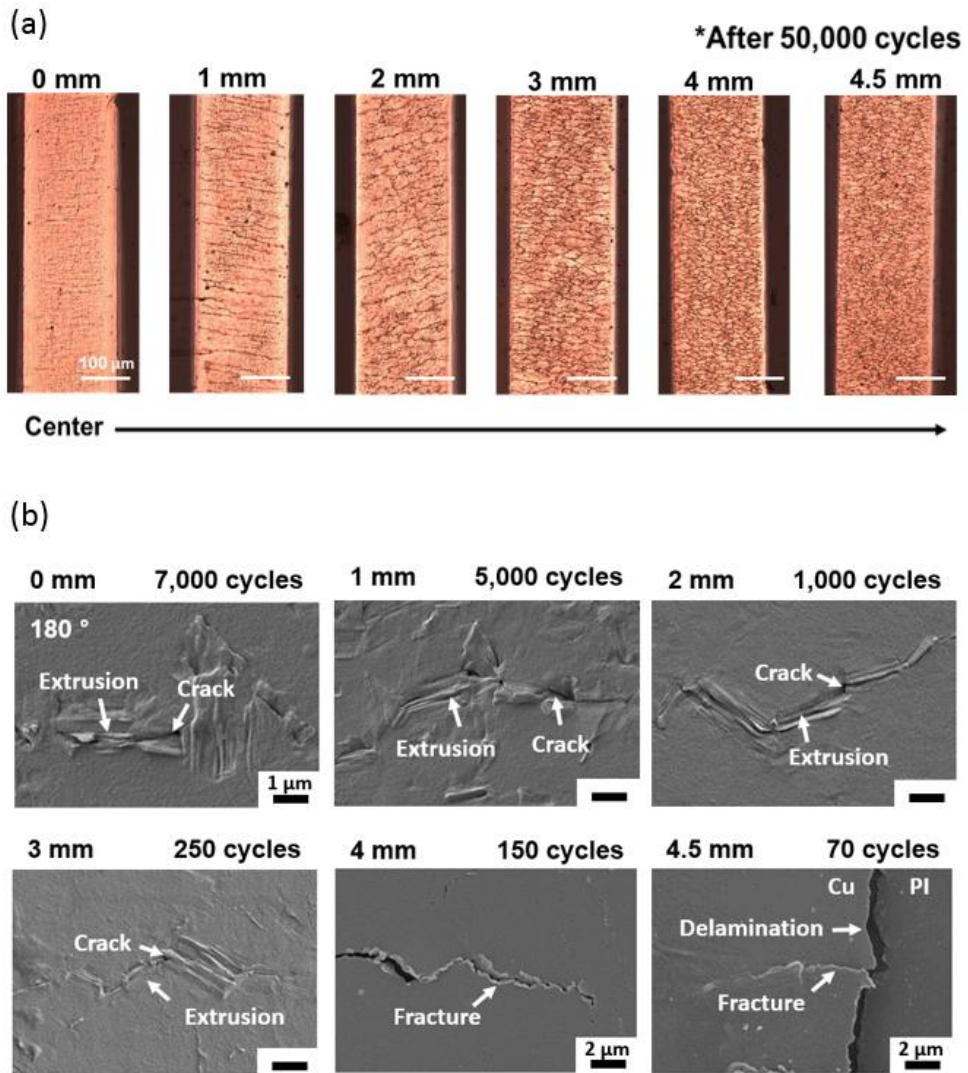


Figure. 4.4 Damage morphologies on surface of the line type sample with different position by (a) OM and (b) SEM.

감소를 일으키는지 알아보기 위해 OM과 SEM 사진을 촬영했다. 먼저 50,000 회 비틀림 실험 후 위치 별 OM(Fig. 4.4a)를 보면 기관의 중심에서 가장자리로 갈수록 x축 방향으로의 크랙 밀도가 점점 증가함을 확인 할 수 있었다. 이는 배선이 기관의 가장자리와 가까이 위치할수록 y축 방향으로의 uniaxial한 tensile stress가 점점 증가함을 의미한다. OM 사진은 동일한 사이클에서 촬영한 이미지이기 때문에 작용한 stress component 구분 하기 힘들었다. SEM 촬영 시에는 각 배선의 failure cycle에서의 이미지를 확보하여 각 위치 별 초기 손상의 발생이 어떤 stress component에 의한 것인지를 확인하고자 했다. SEM 사진은 Fig. 4.4b에서 확인 할 수 있다.  $X = 0-1$  mm 위치에서는 금속의 피로 손상의 전형적인 모습인 extrusion들이 발견되었다. 피로 변형이 발생 하였기 때문에 elastic strain이 우세하게 작용함을 확인 할 수 있었다. 하지만 기존 bending 및 stretching의 손상과 조금 다르게 extrusions들의 방향이 직교하는 모습이 보였다. 이는 biaxial shear stress가 해당 영역에서 dominant하다는 것을 의미한다. Fig. 3.7a에서  $x = 0$  mm에서의 OM 사진을 다시 볼 때 라인의 전체 영역 중 가운데 영역에 크랙들이 집중 발생함을 확인 할 수 있다. Plate형태의 샘플에서 shear stress만이 발생 할 때 가장자리 쪽에서 stress가 거의 0에 가까워 짐을 이론에서 확인 한 것과 일치하는 결과이다.  $X = 2 - 3$  mm에서도 extrusions들과 이를 따라 발생하는 crack모습이 보였으나 extrusions들의 방향이 하나로 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 이는 elastic strain 범위 안에서 uniaxial stress값이 어느정도 커져 shear stress와 동시에 영향을 주었기 때문이다. 샘플 전체 모습을 OM으로 보았을 때 샘플의 가장자리에도



크랙이 발생되고 전파됨을 확인 할 수 있다.  $X = 4 - 4.5$  mm 영역에서는 fracture 및 delamination이 발생했다. 이러한 변형들은 주로 plastic strain에 의해 발생하기 때문에 이 영역에서는 elastic strain에서 plastic strain이 우세하게 작용한 영역으로 바뀌었음을 알 수 있다. Uniaxial 값이 점점 커지다가 elastic strain 영역을 넘어 plastic strain 영역의 값까지 증가했고 더 이상 shear strain의 효과를 볼 수 없게 되었다. SEM 이미지를 통해, 같은 각도 하에서 배선의 기판 위 위치에 따라 fail에 작용하는 stress component 및 값이 차이가 남을 확인했다. 정리하면,  $\pm 180^\circ$  조건에서는  $x = 0 - 1$  mm에서는 elastic strain 범위 내에서 shear strain이 dominant stress component 였다.  $X = 4 - 4.5$  mm에서는 plastic strain의 uniaxial tensile strain이 크게 작용했다.  $X = 2-3$  mm 에서는 이 둘의 혼합된 모습이 보였다. Fatigue 손상이 발견되었지만 방향은  $x = 4-4.5$  mm영역의 손상의 방향을 따른다. 이 영역에서는 elastic strain에서 plastic strain으로의 transition이 발생함을 볼 수 있다. 또한 biaxial shear stress에서 uniaxial tensile stress로의 dominant stress component가 역전하는 구간이기도 함을 유추할 수 있다.

배선의 기판 위 위치가 stress 분포에 주는 영향은 angle에 따라 점차 커졌다. 각각의 위치마다의 비틀림 각도 영향을 보기 위해  $\pm 90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  조건 하에서 저항 변화를 추가로 관찰하였다. 각각의 위치 및 각도 별 저항변화를 Fig 4.5에 나타냈다. 이 Fig 4.5를 보았을 때, 같은 위치 하에서 각도가 증가함에 따라 저항이 증가하지 않았던 위치에서도 저항이 크게 증가하게 됨을 확인 할 수 있었다. 예를 들어  $x = 3$  mm 위치에서  $90^\circ$  각도 하에서는 10만번 비틀림 변화 후에도 저항 변화가 5%에 이르지 못했지만  $120^\circ$  이상의 각도부터는 각도가 커질수록 normalized

resistance change 값이 5%에 점점 빠르게 증가함을 확인 할 수 있었다. 180° 조건에서는 모든 위치에서 10만번 이하의 반복 변형 횟수에서 failure criterion에 도달함을 볼 수 있었다. 3-5 개의 동일 조건의 실험을 진행한 샘플의 데이터를 모으고 피로수명을 통계처리로 얻은 결과 Tab. 4.1과 같이 구할 수 있었다. 90°에서는  $x = 4$  mm 이상의 위치에서, 120°에서는  $x = 3$  mm 에서, 150°에서는  $x = 2$  mm에서, 180°에서는  $x = 1$  mm에서 수명이 급격하게 줄어들었다. 이러한 위치 및 각도가 피로 수명에 주는 영향을 정량화하기 위해서는 기계적인 index가 필요했다. 따라서 비틀림 각도 및 위치에 따른 strain 값을 정량화 하고자 했다.

### 4.3. 각도 및 위치에 따른 변형률 값 계산

#### 4.3.1. FEM simulation을 이용한 변형률 계산

Strain 및 stress 값을 정량화 하기 위해서 FEM simulation (ABAQUS)를 사용하였다. 3.4 에서 설명한 모델을 사용하여 계산하였다. 초기에는 샘플 전체 모델을 그대로 modeling하여 계산을 시도했으나 박막형 모델이기에 meshing 에 문제가 있었으며 계산 시간이 오래 걸렸다. 이를 보완하기 위해 3.4와 같이 Cu 배선 모델을 제외하여 model을 단순화 시킬 수 있었다. 계산 결과 Fig. 4.6와 같이 계산되었다. 모든 stress component가 계산되었지만 박막형 샘플에서  $z$  (두께) 방향 치수가 매우 작아  $z$  축 component가 포함된 대부분의 요소는 무시할 수 있을 만큼 작았다. Fig 4.6를 확인해 보면 equivalent stress는 기관의 중앙에서 가장자리로 갈수록 증가함을 볼 수 있었다. 모든 각도에서

동일한 경향이 계산 되었다. 또한 중앙에서 가장자리로 갈수록 스트레스가 증가하는 현상은 각도가 커질수록 두드러졌다. 계산 된 stress 값들을 각각 Young' s modulus 및 shear modulus로 나누어 strain 값으로 환산했다.

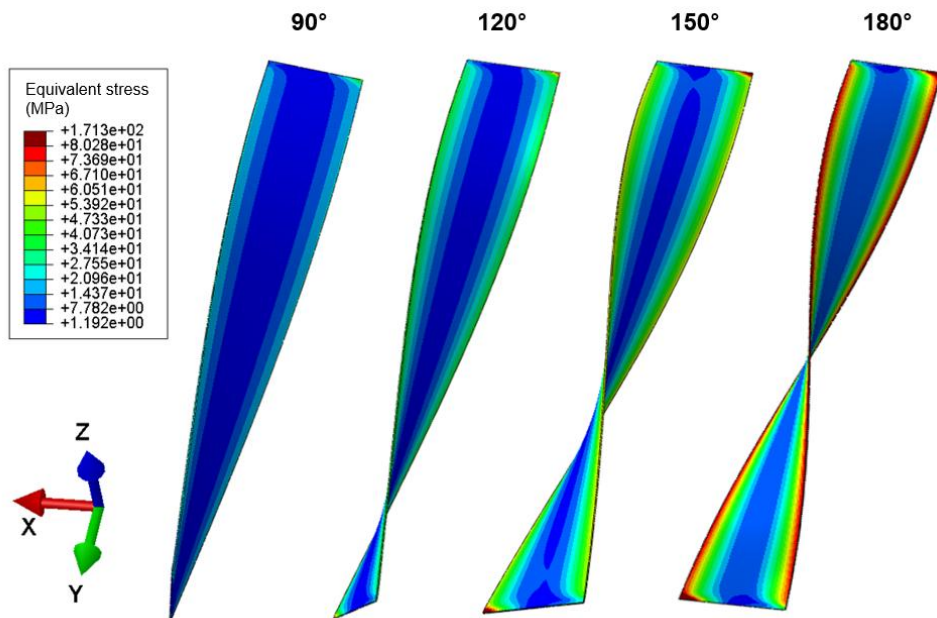


Figure. 4.6 Results of the FEM simulation with various twisting angles.

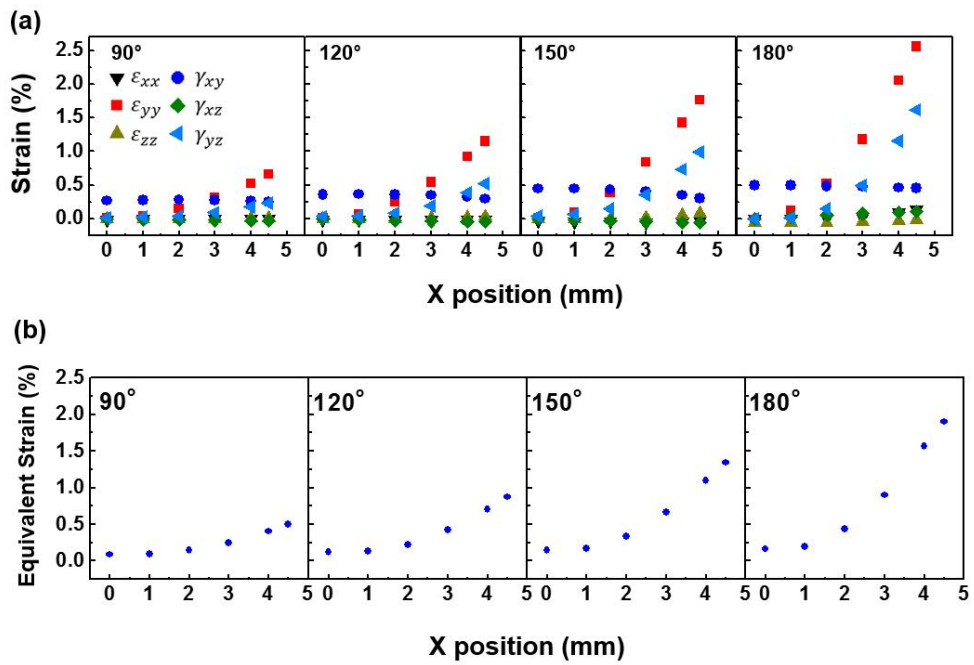


Figure. 4.7 (a) Strain components values with different position and angle and (b) equivalent strain as a function of position and angle.

Strain 값들을 Fig 4.7에 나타냈다.  $90^\circ$  조건에서는 tensile strain( $\epsilon_{yy}$ )이 약  $x = 3$  mm에서 shear( $\gamma_{xy}$ ) 값과 같아지고  $x = 4$  mm에서부터 shear 값 보다 큰 값을 보이게 된다. 이는 피로수명이  $90^\circ$  조건에서  $x = 4$  mm에서부터 급격히 줄어드는 현상과 비교적 잘 맞았다. 동일하게  $120^\circ$  조건에서는  $x = 3$  mm에서부터,  $150^\circ$  조건에서는  $x = 3$  mm,  $180^\circ$ 에서는  $x = 2$  mm에서부터 tensile strain이 dominant하고 이 시점부터 피로수명이 급격히 줄어들었다. 이를 통해 피로수명이 급격하게 줄어드는 이유는 위에서도 대략적으로 확인했듯이 tensile strain에 의한 것이고 tensile strain이 shear strain 보다 큰 시점부터 피로수명이 급격히 줄어들기 시작함을 확인 할 수 있었다.

Shear strain 요소들 중  $\gamma_{yz}$  값은  $90^\circ$  조건에서는 일정하지만 각도가 커질수록, 중심으로부터 벗어날수록 값이 점점 증가한다. 이는 변형이 클 때 단면이 직사각형으로 유지되지 않는 nonlinear 변형에 의해 발생한다. 이를 Wagner stiffening strain이라 하며 FEM simulation을 통해 analytic model에서 구할 수 없었던 값을 정량적으로 나타낼 수 있었다.

비틀림 변형에서는 multi component stress가 발생하기 때문에 하나의 component로만 strain을 대표하기 힘들다. Multi strain들을 모두 포함하는 strain 대푯값이 필요하다. 위치 및 각도에 따른 strain component를 각각 구한 값을 하나의 값으로 통합하기 위해 von Mises strain을 사용했다.

$$\epsilon_{equivalent} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \sqrt{(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{xz}^2)}$$

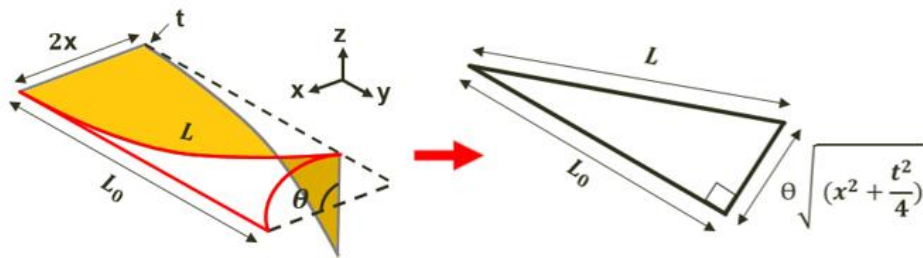
위 식을 이용하여 tensile 및 shear strain을 하나의 통합된 값으로 Fig에 4.7 나타냈다. Von Mises 결과를 볼 때 shear strain가 dominant한 구간과 tensile strain가 dominant한 구간으로 나뉠 수 있다. 각 각도에서 tensile strain 값이 shear strain 값을 역전하는 영역으로 기준을 나눌 수 있다. 주로  $x = 2-3$  mm 영역에서 dominant stress가 shear strain 에서 tensile strain으로 바뀐다. 계산한 각도 범위 내에서 주로  $x = 0-2$  mm 영역에서는 shear strain이 dominant한 strain component이기 때문에 von Mises strain이 거의 일정하거나 증가 폭이 크지 않다. 반면에  $x = 2-4.5$  mm 구간에서는 tensile strain이 dominant strain component가 되고 이 값은 기관 위 위치에 큰 영향을 받기 때문에 해당 영역에서는 von Mises strain 값이 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4.3.2. Analytic model을 이용한 변형률 계산

4.3.1에서 FEM simulation으로 계산한 strain 값이 적절한 값인지 확인함과 동시에, bending strain을 구하는 간단한 식과 같이 strain을 값을 구하는 식을 도출하기 위해 analytic model을 설정하였다. Fig 4.8을 보면 plate형 샘플에서 초기 길이를  $L_0$ , 너비  $2x$ , 비틀림 각도  $\theta$ , 비틀림 후의 길이  $L$ , 두께를  $t$  이라고 표기하였다. 비틀림 변형 후 너비 쪽 모서리가 그리는 호의 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R\theta = \sqrt{\left(x^2 + \frac{t^2}{4}\right)} \cdot \theta$$

변형 후 길이(L)는 초기 길이( $L_0$ )와 위에서 구한 호의 길이로 표현 가능하다. Fig 4.8에서 빨간 선을 따로 떼어 보면 너비 쪽 호와 길이 쪽  $L_0$



$$\epsilon_{\text{tensile}} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\sqrt{L_0^2 + \theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})} - L_0}{L_0} = \sqrt{1 + \frac{\theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})}{L_0^2}} - 1 \approx \sqrt{1 + (\frac{\theta x}{L_0})^2} - 1 \quad (\because t \ll x)$$

Figure. 4.8 Analytic equation for tensile strain by twisting. The equation can be simplified because  $t$  is very small compared to the width.

는 각 길이가 속하는 면들이 수직이므로 두 선은 직각을 이룬다. 두 곡선을 곡선을 펴서 직선으로 만들면 Fig 4.8와 같은 직각삼각형을 이룬다. 변형 후의 L 값은 따라서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \sqrt{L_0^2 + \theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})}$$

따라서 tensile strain 값은 아래와 같이 표현 가능하다.

$$\epsilon_{\text{tensile}} = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\sqrt{L_0^2 + \theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})} - L_0}{L_0} = \sqrt{1 + \frac{\theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})}{L_0^2}} - 1$$

위 식에서 t 값은 박막이기 때문에 x 값에 비해 매우 작다. 따라서 위 식을 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{\text{tensile}} = \frac{L-L_0}{L_0} = \sqrt{1 + \frac{\theta^2(x^2 + \frac{t^2}{4})}{L_0^2}} - 1 \approx \sqrt{1 + (\frac{\theta x}{L_0})^2} - 1 \quad (\because t \ll x)$$

Shear strain 값은 아래와 같이 rectangular 단면일 때의 식을 이용했다.

$$\gamma_{\text{shear}} = \frac{t\theta}{L_0}$$



위 두 식을 이용하여 equivalent von Mises strain을 및 각도 별로 계산하면 Fig 4.9와 같이 식을 얻을 수 있다. FEM simulation 값과 비교해 보았을 때 경향성 및 값이 잘 일치함을 확인 할 수 있었다.

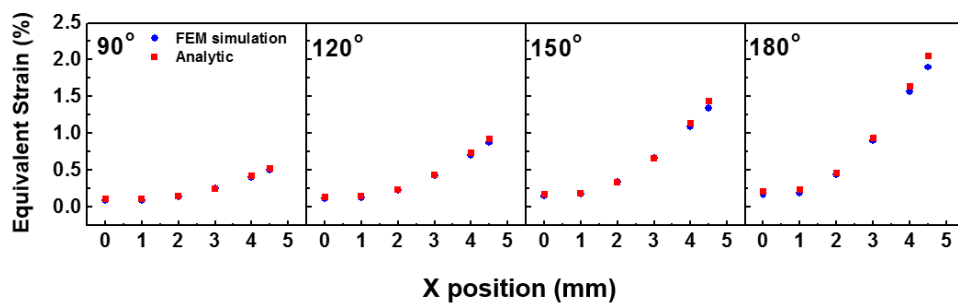


Figure. 4.9 Comparison between analytic and FEM simulation of equivalent strain by various positions and angles.

#### 4.4. Strain–failure cycle curve

#### 4.4.1. Shear/tensile strain–failure cycle curve

위에서 얻은 각 위치, 각도 별 피로수명과 FEM simulation으로 얻은 strain 값들을 이용하여 strain–failure cycle 좌표계에 data point를 찍었다. Fig 4.10a에서 shear strain 만을 이용했을 때 데이터들이 하나의 linear line에 fitting 되었다. 이 line은 low cycle 영역에서 plastic strain이 작용하는 영역을 설명하기 힘들다. Strain 값의 차이가 크지 않아 elastic strain에서 plastic strain으로 역전되는 현상을 보이기 힘들었다. 반면에

tensile strain으로만 그래프를 그렸을 때는 low cycle에서는 하나의 linear line에 잘 fitting 되지만  $10^4$  이상의 cycle 영역에서는 잘 fitting이 되지 않는다. Tensile strain 으로만 plotting할 경우에도 elastic strain에서 plastic strain으로 dominant strain 종류가 변하는 현상을 설명하기 힘들다. Bending 이나 stretching과 같이 tensile 또는 compressive strain 중 하나의 uniaxial strain만을 고려하면 되었으나 twisting에서는 하나의 strain component만으로는 Coffin–Manson 또는 Basquin 관계식을 보이기 힘들었다. 따라서 이 둘을 모두 아우르는 strain 값이 필요하다.

#### 4.4.2. Von Mises strain–failure cycle curve

위에서 설명한 한계점을 극복하기 위해 두 strain component를 포함하는 von Mises strain을 이용하여 strain–failure cycle curve를 Fig

4.10b와 같이 그렸다. Shear 또는 tensile strain 만을 이용했을 때와 달리

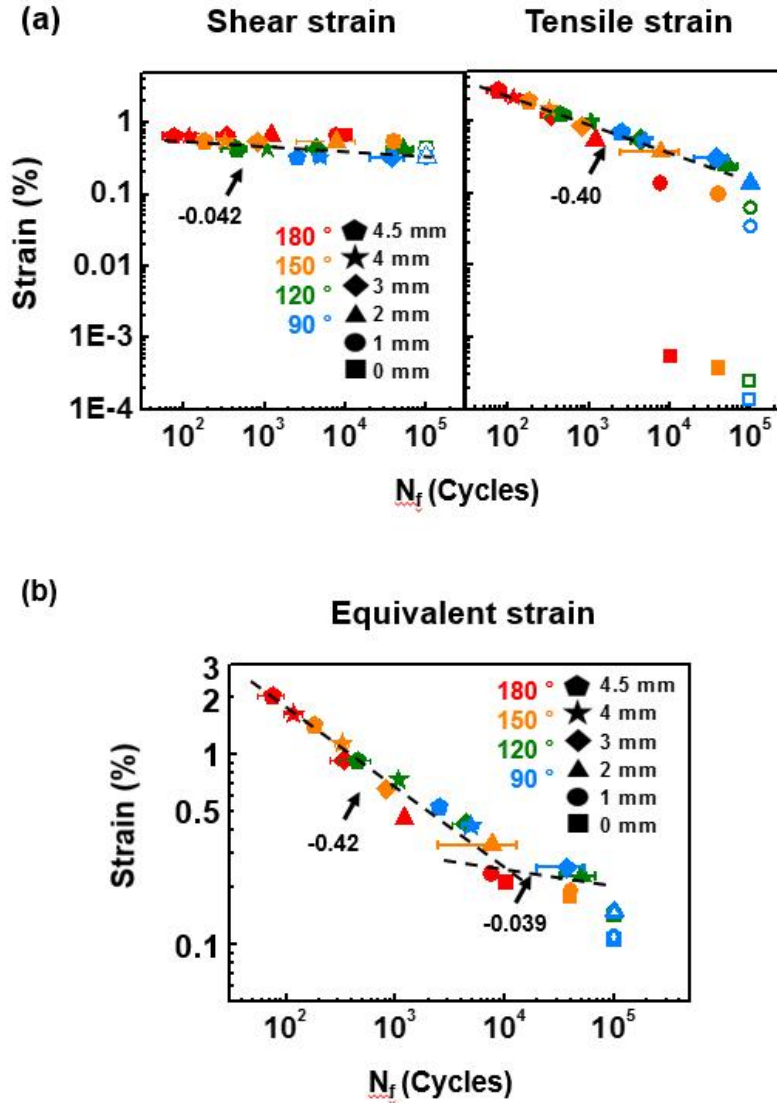


Figure. 4.10 Strain vs. failure cycle using (a) tensile or shear strain only and (b) equivalent von Mises strain that includes both tensile and shear strain.

2개의 다른 기울기를 갖는 linear line에 각각 low cycle 영역과 high cycle 영역이 fitting 되었다. 각각의 기울기는 low cycle 영역은  $-0.42$ , high cycle 영역은  $-0.039$ 이다. Low cycle에서의 linear line은 tensile strain이 dominant한 von Mises 값의 영역을 나타냈다. 반대로 high cycle 영역은 약  $0.25\%$  von Mises strain 이하의 값으로 shear strain이 dominant한 범위이다. 이 strain-failure cycle curve와 4.3.1에서 보인 strain component의 분포를 대조하면 알 수 있듯이, low cycle region은 tensile strain가 dominant한 von Mises strain 영역이고, high cycle region은 shear strain이 dominant한 von Mises strain 영역이다. 이는 4.2에서 Fig 4.4b의 SEM 사진과 비교해보아도 일치했다.  $X = 0-1$  mm에서는 shear dominant한 초기 피로손상을 보였고,  $x = 2 - 3$  mm에서는 tensile 값이 dominant하여 uniaxial한 하나의 방향으로 피로손상이 발생하고 전파됨을 확인할 수 있고, 그 이상부터는 uniaxial plastic strain이 크게 작용하는 영역으로 필름의 rupturing이 발생함을 확인 할 수 있었다. 이는 문헌과 비교했을 때,  $1.5\%$  strain 값 이상부터는 plastic strain에 의한 failure를 보이고 그 이하의 strain에서는 fatigue damage를 관찰 할 수 있음과 일치했다 [4.2-4.6].

Strain의 종류에 따라 분류한다면 von Mises strain이  $1.5\%$  이상인 영역에서는 plastic strain이 dominant하고 약  $0.25\%$  이하의 영역에서는 elastic strain이 dominant함을 알 수 있다. 그 중간 영역인  $0.25\sim 1.5\%$  사이에서는 elastic과 plastic strain이 동시에 작용하는 영역으로 볼 수 있다 [4.1-4.2]. 이 그래프를 보면 같은 각도에서 실험을 하더라도  $x$  위치가 변함에 따라 von Mises strain이 달라지고 해당 영역에서의 damage발생에 작용하는 strain의 type 및 component가 달라진다. 예를 들어  $180^\circ$  각도에서도  $x = 4.5$  mm에서는 plastic strain인 tensile

strain이 failure에 크게 작용하지만,  $x = 0$  mm 에서는 elastic strain인 shear strain이 dominant strain 이여서 피로수명이 상대적으로 길다. 이와 유사하게, 같은 위치에서도 각도가 달라지면 strain type 및 component가 달라진다. 예를 들어,  $x = 4.5$  mm 에서  $180^\circ$  에서는 plastic tensile strain 영역에 해당하고,  $120^\circ$  에서는 plastic + elastic / tensile + shear strain 영역에 해당하는 것을 확인 할 수 있었다. 즉, 비틀림 피로 실험을 진행 할 때 active area의 위치와 비틀림 각도에 따라 발생하는 각각의 strain component들을 동시에 포함하는 von Mises strain 값을 고려하는 것이 매우 중요하다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 유연 기판 위 박막 금속의 기초적인 비틀림 피로거동을 규명했다. 연구하기에 앞서 비틀림 피로 실험을 위한 장비를 설계 및 개발하였다. 장비를 설계 할 때 비틀림 변형에서의 불균일한 변형에 대한 측정 방법과 신뢰성 측정 목적에 초점을 맞춰 설계했다. 실험에서 사용한 샘플은 polyimide 위 Cu 박막물질을 사용했다.

실험에서 설정했던 중요 변수는 Cu 박막의 회전축으로부터의 거리 및 비틀림 각도였다. 초기에는 필름형 타입의 샘플로 실험을 진행했으나 회전축으로부터의 거리에 따른 전기저항 변화를 측정하기 힘들어 배선형 타입의 구리 샘플로 실험하였다.

PI 기판 너비의 중심에 회전축을 위치시키고 이 위치를  $x = 0$  mm라고 정했을 때, 배선을 PI 기판 위에  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 4.5$  mm 위치하도록 패터닝을 했다. 각각의 위치별 저항 변화를 관찰한 결과 회전축의 위치로부터 멀어질수록 배선의 저항 증가는 더욱 낮은 변형 횟수에서 크게 증가했다. 전기저항 변화 값이 5%에 도달했을 때를 금속 박막의 파괴까지 걸린 변형 횟수로 정의했을 때, 피로 수명은 회전축으로 멀어질수록 급격한 감소를 보였다. 이러한 경향성은 각도가 증가할수록 더욱 부각되었고  $\pm 180^\circ$  실험 조건에서는  $x = 4.5$  mm에서는 75 회,  $x = 0$  mm에서는 약 10,000회의 피로수명을 보이며 매우 큰 차이를 보였다.

금속박막이 파괴된 시점에서의 크랙을 살펴보면 회전축과 가깝고 각도가 낮을수록 전단응력에 의한 두축 방향의 extrusion들이 발견되었다. 회전축으로부터 멀어지고 각도가 커질수록 단축 방향의 인장력에 의한



extrusion들이 발견되었고 극단적으로는 필름의 fracture나 박리 현상까지 보이기도 했다.

위 경향성을 정량화하기 위해 FEM simulation과 analytic model을 통해 각각의 조건 별 응력 및 변형률 값을 구하였다. 계산한 변형률 값들과 피로수명을 통해 Coffin-Manson 및 Basquin에 fitting 해보았다. 각각의 조건에 따라 low cycle fatigue (LCF) 및 high cycle fatigue (HCF) 영역이 구분되었다. 약 4만번 반복 변형 횟수 전후로 LCF 및 HCF 영역이 구분되었다. LCF 영역에서는 소성 변형률이, HCF 영역에서는 탄성변형률이 커 피로 수명을 결정짓는데 큰 영향을 끼쳤다. 크랙 모양과 비교했을 때, 0.25% 이하에서는 elastic에 의한 피로 파괴가, 약 0.5 - 1.5%에서는 elastic 과 plastic strain에 의한 피로 파괴가, 1.5% 이상에서는 plastic strain에 의한 rupturing이 일어났다.

본 연구의 결과들을 미루어볼 때, 유연소자의 비틀림 피로 조건에서 고신뢰성을 확보하기 위한 방법은 간단했다. 소자의 active 영역을 회전축과 최대한 가깝게 위치시키는 것이고 비틀림 회전 각도가 클수록 이를 더욱 유념해야 한다. 박막 소자에 전단 응력을 가장 크게 작용 시키면 많은 변형 횟수를 가해도 박막의 가장자리 영역에 피로 손상이 거의 발생하지 않아 안정적인 전자 이동 통로를 확보 할 수 있다.

본 연구는 샘플의 양 끝의 위치를 고정시킨 조건에 한정해 실험을 진행하였다. 비틀림 변형은 말림 현상을 동반하기 때문에 비틀림 신뢰성 평가 분야를 좀 더 확고히 확립하려면, 비틀림을 인가하며 말림 변형을 따라 작동하는 장비 시스템도 구축되어야 한다. 현재 비틀림 및 신축 구동 시스템 구축을 위해 한 쪽 지그에 추를 달아 장비 개조를 진행중이며, 언급한 비틀림 실험 조건은 차후 실험으로 계획 중이다.

## References

- [1.1] R. H. Reuss *et al.* Macroelectronics: perspectives on technology and applications, *IEEE* **93**, 1239~1256 (2005)
- [1.2] S. P. Lacour *et al.* Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces, *IEEE*, **93**, 1459~1467 (2005)
- [1.3] G. M. Whitesides *et al.* Microsolidics: fabrication of three-dimensional metallic microstructures in Poly(dimethylsiloxane), *Advanced. Material* **19** 727~ 733 (2007)
- [1.4] T. Someya *et al.* Integration of organic FETs with organic photodiodes for a large area, flexible, and lightweight sheet image scanners, *IEEE Trans. Electron Devices* **52**, 2502~2511 (2005)
- [1.5] T. Someya *et al.* Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes, *National Academy Science USA* **102**, 123211~12325 (2005)
- [1.6] J. A. Rogers *et al.* Paper-like electronic displays: Large-area rubberstamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks, *National Academy Science USA* **98**, 4835~4840 (2001)
- [1.7] KDB 산업은행, 플렉서블 디스플레이 기술동향, 2014
- [1.8] Lahey, B., Girouard, A., Burleson, W. & Vertegaal R in *Conference on*

- 
- Human Factors in Computing Systems, 2011 Proceedings 29<sup>th</sup>: Vancouver, BC. 1303-1312 (2011)*
- [1.9] Danielsson M., Parks D. M. & Boyce M. C. Micromechanics, macromechanics and constitutive modeling of the elasto-viscoplastic deformation of rubber-toughened glassy polymers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **55**, 533-561 (2007)
- [1.10] Kim D. H, *et al.* Epidermal electronics. *Science* **333**, 838-843 (2011)
- [1.11] Wagner S., Bonderover E., Jordan, W.B. & Strum J. C. Electrotextiles: Concepts and challenges. *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **12**, 391-399 (2002)
- [1.12] Kim K. S. *et al.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature* **457**, 706-710 (2009)
- [1.13] Chiu S. L. Leu J. & Ho P. S. Fracture of metal-polymer line structures. I. Semiflexible polyimide. *Journal of Applied Physics* **76**, 5136-5142 (1994)
- Xiang Y., Li T., Suo Z. & Vlassak J.J. High ductility of a metal film adherent on a polymer substrate. *Applied Physics Letters* **87**, 1-3 (2005)
- [1.14]
- [1.15] Lu N., Wang X., Suo, Z. & Vlassak J.J. Metal films on polymer substrates stretched beyond 50%. *Applied Physics Letters* **91** (2007)
- [1.16] Lu N., Wang X., Suo, Z. & Vlassak J.J. Failure by simultaneous grain growth, strain localization and interface debonding in metal films on polymer

- hr/>
- substrates. *Journal of Materials Research* **24**, 379-385 (2009)
- [1.17] Li, T. *et al.* Delocalizing strain in a thin metal film on a polymer substrate. *Mechanics of Materials* **24**, 261-273 (2005)
- [1.18] Kraft O., Wellner P., Hommel M., Schwaiger R. & Arzt E. Fatigue behavior of polycrystalline thin copper films. *Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques* **93**, 392-400 (2002)
- [1.19] Schwaiger R. & Kraft O. High cycle fatigue of thin silver films investigated by dynamic microbeam deflection. *Scripta Materialia* **41**, 823-829 (1999)
- [1.20] Lacour S. P., Wagner S., Huang Z. & Suo Z. Stretchable gold conductors on elastomeric substrates. *Applied Physics Letters* **82**, 2404-2406 (2003)
- [1.21] R. Zhou, W. Guo, R. Yu, C. Pan, Highly flexible, conductive and catalytic Pt networks as transparent counter electrodes for wearable dye-sensitized solar cells, *Journal of Materials Chemistry. A* **3**(45) 23028-23034 (2015)
- [1.22] Y. Zhang, R.C. Webb, H. Luo, Y. Xue, J. Kurniawan, N.H. Cho, S. Krishnan, Y. Li, Y. Huang, J.A. Rogers, Theoretical and Experimental Studies of Epidermal Heat Flux Sensors for Measurements of Core Body Temperature, *Advanced Healthcare Materials* **5**(1), 119-27 (2016)
- [1.23] S.G. Yoon, H.J. Koo, S.T. Chang, Highly Stretchable and Transparent Microfluidic Strain Sensors for Monitoring Human Body Motions, *ACS Appl Mater Interfaces* **7**(49) 27562-70 (2015)

- 
- [1.24] J. Yoo, S. Cho, W. Kim, J.Y. Kwon, H. Kim, S. Kim, Y.S. Chang, C.W. Kim, D. Choi, Effects of mechanical deformation on energy conversion efficiency of piezoelectric nanogenerators, *Nanotechnology* **26(27)** 275402 (2015)
- [1.25] A.-L. Wang, C. Zhang, W. Zhou, Y.-X. Tong, G.-R. Li, PtCu alloy nanotube arrays supported on carbon fiber cloth as flexible anodes for direct methanol fuel cell, *AIChE Journal* **62(4)** 975-983 (2016)
- [1.26] S. Song, J. Jang, Y. Ji, S. Park, T.-W. Kim, Y. Song, M.-H. Yoon, H.C. Ko, G.-Y. Jung, T. Lee, Twistable nonvolatile organic resistive memory devices, *Organic Electronics* **14(8)** 2087-2092 (2013)
- [1.27] B. Song, L. Li, Z. Lin, Z.-K. Wu, K.-s. Moon, C.-P. Wong, Water-dispersible graphene/polyaniline composites for flexible micro-supercapacitors with high energy densities, *Nano Energy* **16** 470-478. (2015)
- [1.28] J.-W. Lim, S.-I. Oh, K. Eun, S.-H. Choa, H.-W. Koo, T.-W. Kim, H.-K. Kim, Mechanical Flexibility of ZnSnO/Ag/ZnSnO Films Grown by Roll-to-Roll Sputtering for Flexible Organic Photovoltaics, *Japanese Journal of Applied Physics* **51** 115801 (2012)
- [1.29] K. Eun, E.K. Lee, M.K. Lee, K. Kim, W. Kim, K. Shin, S.-H. Choa, Mechanical integrity and environmental reliability of a single wall carbon nanotube as a flexible transparent conducting electrode, *Japanese Journal of Applied Physics* **53(5S1)** (2014)

- 
- [1.30] D.-Y. Cho, K. Eun, S.-H. Choa, H.-K. Kim, Highly flexible and stretchable carbon nanotube network electrodes prepared by simple brush painting for cost-effective flexible organic solar cells, *Carbon* **66** 530-538 (2014)
  - [2.1] Klesnil M & Lukas P. Fatigue of Metallic Materials; Elsevier : New york (1992)
  - [2.2] Suresh S., Fatigue of Materials, Cambridge University Press, Cambridge. (1998)
  - [2.3] Ruth Schwaiger, Fatigue Behavior of Sub-Micron Silver and Copper Films, Max-Planck-Institute (2001)
  - [2.4] Wöhler, A., "Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagen-Achsen einwirkenden Kräfte undder Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen", Zeitschrift f. Bauwesen 10, (1860)
  - [2.5] Basquin, O. H. The exponential law of endurance tests, *Proc. of the ASTM* **10**, 625-630 (1910).
  - [2.6] Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, *McGraw-Hill*, 392 (1988)
  - [2.7] Morrow, J. D., in Fatigue Design Handbook - Advances in Engineering, Vol. 4, Sec. 3.2 (Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, (1968)), pp. 21-29.
  - [2.8] Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals *Journal of Materials* **5 (4)**, 767-778 (1970).

- 
- [2-9] Coffin, L. F., Jr., A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, *Trans. ASME* **76**, 931-950 (1954)
  - [2-10] Manson, S. S., Behavior of materials under conditions of thermal stress, *National advisory commission on aeronautics: Report 1170* (Lewis flight propulsion laboratory, Cleveland (1954)).
  - [2-11] Mughrabi, H., The cyclic hardening and saturation behavior of copper single crystals, *Mater. Sci. Eng.* **33**, 207-223 (1978).
  - [2-12] Venkatraman, R. and Bravman, J. C., Separation of film thickness and grain boundary strengthening effects in Al thin films on Si, *J. Mater. Res.* **7 (8)**, 2040-2048 (1992)
  - [2-13] Irving H. Shames & James M. Pitarresi, Introduction to Solid Mechanics, 3<sup>rd</sup> edition., (2000)
  - [3-1] T.L. Ma, J. Kujansuu, M. Pesonen, & J. Maattanenn, Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'05), Shanghai, 27-29 June (2005)
  - [3-2] Taha A. Elwi, Hussain M. Al-Rizzo, Daniel G. Rucker & Haider R. Khaleel., Effects of twisting and bending on the performance of miniaturized truncated sinusoidal printed circuit antenna for wearable biomedical telemetry devices. *International Journal of Electronics and Communications* **65**, 217-225 (2011)
  - [3-3] Y.C Lee & T.S. Liu, Deformation of Multilayer Flexible Electronics

- 
- Subjected to Torque, *Society for Experimental Mechanics* **38** (2014)
- [4-1] Byoung-Joon Kim, Hae-A-Seul Shin, Sung-Yup Jung, Yigil Cho, Oliver Kraft, In-Suk Choi, Young-Chang Joo, Crack nucleation during mechanical fatigue in thin metal films on flexible substrates, *Acta Materialia* **61(9)** (2013)
- [4-2] Byoung-Joon Kim, Hae-A-Seul Shin, Ji-Hoon Lee, Tae-Youl Yang, Thomas Haas, Patric Gruber, In-Suk Choi, Oliver Kraft, and Young-Chang Joo, Effect of Film Thickness on Stretchability and Fatigue Resistance of Cu Film on Polymer Substrate, *Journal of Materials Research* **29(23)** (2014)
- [4-3] D.S. Gray, J. Tien, C.S. Chen, High-Conductivity Elastomeric Electronics, *Advanced Materials* **16(5)**, 393-397 (2004)
- [4-4] S.L. Chiu, J. Leu, P.S. Ho, Fracture of metal-polymer line structures. I. Semiflexible polyimide, *Journal of Applied Physics* **76(9)**, 5136 (1994)
- [4-5] R. R Keller, J. M Phelps, D.T Read, Tensile and fracture behavior of freestanding copper films, *Materials Science and Engineering A214*, 42-52 (1996)
- [4-6] Xiang Y., Li T., Suo Z. & Vlassak J.J. High ductility of a metal film adherent on a polymer substrate. *Applied Physics Letters* **87**, 1-3 (2005)



## Abstract

Next generation electronics are not restricted to portability but developed to be attached to the human skin and even implanted to the human body. Electronics should overcome the curvature of human body and endure the repeated movements, requiring materials to be flexible. In this trend importance of mechanical reliability increases as well as electrical and thermal reliability. Especially, maintenance of performance under repeated deformation is essential in mechanical reliability. Metal as the interconnect and electrode can effect directly to the device performance. Previous researches of fatigue behavior focused mainly on the mechanical reliability of bending and tensile deformation. In the real flexible electronics twisting, crumpling and other more complex deformation can be applied. To understand the complex deformation, we studied the twisting fatigue behavior of Cu interconnects on the flexible substrate and analysis the stress distribution on the Cu interconnects by FEM simulation.

We fabricated the 200  $\mu\text{m}$  width – Cu interconnect which has 1  $\mu\text{m}$  thick on the 6 mm  $\times$  60 mm  $\times$  0.1 mm PI substrate by evaporator. To estimate the dependence of position along the width direction, 3 Cu interconnects are deposited on the one PI substrate. Cu interconnects are located at X=0, 1, 2, 3, 4 and 4.5 mm respectively, when the center position of the substrate with width direction is designated to X=0 mm. Twisting fatigue tests were performed under  $\pm 90^\circ$ ,  $\pm 120^\circ$ ,  $\pm 150^\circ$  and  $\pm 180^\circ$  and 0.5 Hz condition. As the Cu interconnect located far from the rotation axis, fatigue lifetime decreased dramatically. Cu interconnect on the rotation axis showed longest

fatigue lifetime, while the lifetime shortened as the interconnects became close to the edge of the PI substrate. This tendency was magnified as the twisting angle became large. At the center of the substrate, only shear stress was dominantly applied both the vertical and horizontal cracks seemed to be occurred at the center of the interconnects. However, at the edge of the interconnects, crack-free zone was observed and the conduction path were maintained. As the interconnects became far from the rotation axis, transverse cracks were observed more densely.

Twisting deformation involved the shear and tensile stress, where their distributions were analyzed by FEM simulation and analytic model. We plotted strain-failure cycles curve and found that it followed Coffin-Manson and Basquin relationship well. In strain-failure cycles curve, low cycle fatigue (LCF) and high cycle fatigue (HCF) regime were identified with different slope of the fitting line. These regime was determined by position and twisting angle and showed different failure damage types, which significantly affects to the fatigue lifetime.

We observed the width-direction position effects on the Cu interconnects under repeated twisting deformation and analyzed the stress distribution of each stress components by FEM simulation and analytic model. This research can provide basic design guideline for preventing twisting fatigue damages to flexible devices.

---

**Keywords:** Flexible devices, Twisting fatigue behavior, metal thin film, Stress analysis, Reliability